

Tesis de Posgrado

Estructura del flujo medio del aire afectado por rompevientos

Gardiol, Jesús María

1989

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Meteorológicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Gardiol, Jesús María. (1989). Estructura del flujo medio del aire afectado por rompevientos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2232_Gardiol.pdf

Cita tipo Chicago:

Gardiol, Jesús María. "Estructura del flujo medio del aire afectado por rompevientos". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1989.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2232_Gardiol.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

ESTRUCTURA DEL FLUJO MEDIO DEL AIRE AFECTADO POR ROMPEVIENTOS

Elaborada por el Licenciado Jesús María Gardiol para acceder al título
de Doctor en Ciencias Meteorológicas

Director de Tesis: Dr. Nicolás A. Mazzeo

1989

- 2232 -
y.2

INDICE

INDICE	I
INDICE DE TABLAS	II
SIMBOLOS	III
RESUMEN	1
1. INTRODUCCION	2
2. EFECTOS CAUSADOS POR EL VIENTO	4
2.1 Generalidades	4
2.2 Efecto originado por el viento sobre las plantas	4
2.3 Efecto ejercido por el viento sobre el contenido de agua en el suelo	8
2.4 Influencia del viento sobre el intercambio de dióxido de carbono	13
2.5 Daños mecánicos en las plantas producidos por el viento	14
2.6 Efecto del viento sobre los suelos desnudos	15
3. MODIFICACION DEL FLUJO DEL AIRE POR LAS CORTINAS ROMPE-VIENTOS	17
4. MODELO DE SIMULACION DEL FLUJO DEL AIRE OBSTACULIZADO POR UNA CORTINA ROMPEVIENTOS	23
5. DESARROLLO DE UN MODELO SEMIEMPIRICO QUE DESCRIBE EL FLUJO DEL AIRE OBSTACULIZADO POR UNA CORTINA ROMPEVIENTOS	41
5.1 La capa límite atmosférica	41
5.2 Hipótesis de la semejanza euleriana aplicada al flujo del aire en una capa límite de superficie, con interposición de una cortina rompevientos	41
5.3 Análisis dimensional	44
5.4 Relación entre el coeficiente de arrastre aerodinámico y la porosidad de la cortina	48
5.5 Formas funcionales de R	53

5.6	Inclusión de la porosidad como parámetro representativo de la cortina	57
5.7	Influencia de la estabilidad atmosférica sobre la eficiencia de las cortinas rompevientos	66
5.8	Análisis de sensibilidad del modelo	69
5.8.1	Sensibilidad respecto a la longitud de rugosidad	69
5.8.2	Sensibilidad respecto a la altura de la cortina rompevientos	69
5.8.3	Sensibilidad de la porosidad de la cortina	69
5.9	Análisis de propagación de errores	71
6.	COMPARACION DEL MODELO SEMIEMPIRICO CON DATOS OBSERVACIONALES	74
6.1	Introducción	74
6.2	Comparación del modelo con datos observacionales	78
6.2.1	Cortinas rompevientos con el 50% de porosidad	78
6.2.2	Porosidad variable	83
6.3	Discusión	89
7.	CONCLUSIONES	92
	REFERENCIAS	93
		98
		105
		110
		103

INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla I	113
Tabla II	114
Tabla III	114
Tabla IV	115
Tabla V	116
Tabla VI	117
Tabla VII	117
Tabla VIII	118
Tabla IX	118
Tabla X	119
Tabla XI	120
Tabla XII	120
Tabla XIII	121
Tabla XIV	121
Tabla XV	122
Tabla XVI	123
Tabla XVII	125
Tabla XVIII	126
Tabla XIX	127
Tabla XX	127
Tabla XXI	128
Tabla XXII	129
Tabla XXIII	130
Tabla XXIV	130
Tabla XXV	131
Tabla XXVI	131
Tabla XXVII	132
Tabla XXVIII	132

SIMBOLOS

- a área foliar,
- C flujo de turbulento calor latente,
- C_D coeficiente de arrastre aerodinámico,
- c_p calor específico a presión constante,
- D coeficiente de difusión de un gas en el aire,
- D_c fuerza de arrastre friccional originada por una cortina,
- d diámetro medio de un poro estomático,
- d_0 desplazamiento del plano cero,
- E flujo de vapor de agua,
- e presión parcial de vapor del agua,
- e_s presión de saturación del vapor de agua,
- F flujo de masa,
- F_d intercambio de dióxido de carbono,
- G fuerza de arrastre friccional sobre la superficie terrestre,

G_s flujo de calor en el suelo,
 g aceleración de la gravedad terrestre,
 H altura de las cortinas rompevientos,
 H_t flujo turbulento total de calor sensible y latente,
 K energía cinética turbulenta,
 k constante de von Kármán,
 L_0 longitud de Monin-Obukhov,
 Nu número de Nusselt,
 P energía radiante utilizada en la fotosíntesis,
 Q_a concentración de dióxido de carbono en el medio ambiente,
 Q_h concentración de dióxido de carbono en la hoja,
 R flujo neto de radiación,
 Re número de Reynolds,
 Ri número de Richardson,
 r resistencia producida por la capa límite de una hoja (subíndice:
 "E" flujo de calor latente, v vapor de agua),

r_e resistencia de los estomas,
 r_c resistencia de la cutícula de una hoja,
 Sh número de Sherwood,
 S_k término de creación y destrucción de energía turbulenta,
 T_a temperatura del aire,
 l_ϵ coeficiente de intercambio efectivo de disipación turbulenta,
 T_k coeficiente de intercambio efectivo de energía turbulenta,
 T_s temperatura de la superficie de la hoja,
 T_* temperatura característica,
 u componente horizontal de la velocidad media del viento (subíndice:
"o" y "x" a barlovento y sotavento de una cortina rompevientos,
respectivamente),
 u_c velocidad característica,
 u' velocidad relativa del viento (u_x / u_o),
 u_x velocidad de fricción,
 z coordenada vertical,

- z_0 longitud de rugosidad para el terreno (subíndice: "h" y "t" para el vapor de agua y calor sensible, respectivamente),.
- z_t límite de la capa límite planetaria,
- z' altura relativa (z/H),
- x coordenada horizontal,
- x' distancia relativa (x/H),
- w componente vertical de la velocidad media del viento,
- γ constante psicrométrica,
- γ^* constante psicrométrica aparente correspondiente a la hoja,
- δ_x diferencia de concentración de vapor de agua,
- ϵ disipación de energía turbulenta,
- θ temperatura potencial,
- K difusividad térmica,
- λ calor latente de vaporización a presión constante,
- μ' viscosidad dinámica,
- μ'_t viscosidad dinámica efectiva,

γ viscosidad cinemática,

ρ densidad del aire,

q_k número de Prandtl de difusión de energía turbulenta,

ϕ_M cortante adimensional de la velocidad del viento,

ϕ_H gradiente adimensional de la temperatura,

τ_o tensión horizontal de corte,

χ concentración de masa por encima de la capa límite de una hoja,

χ_s concentración de masa sobre la superficie de una hoja,

RESUMEN

El conocimiento de la efectividad de una cortina rompevientos, posibilita delinear y predecir su influencia sobre los cultivos, la estabilización de los suelos y la evapotranspiración.

Las modificaciones que se producen en las variables meteorológicas, en las propiedades del suelo, en los animales y las plantas al interponer una cortina rompevientos al flujo del aire se deben, principalmente, a la variación en la estructura del aire que se verifica a sotavento de la misma. La reducción del viento en la zona "protegida" depende de la longitud, de la porosidad y del tipo de cortina rompevientos como, así también, de la estabilidad de la atmosférica y de las características aerodinámicas del terreno.

Con el objeto de estudiar el efecto de una cortina rompevientos sobre el flujo del aire, se desarrolla un modelo semiempírico a partir de la aplicación del análisis dimensional ordinario, que permite estimar cuantitativamente la reducción del viento a sotavento de la misma.

El modelo propuesto permite obtener la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos, en condiciones de neutralidad atmosférica y rompevientos cuyas porosidades varían entre un 20% y un 50%.

Los valores obtenidos por el modelo son comparados con datos experimentales, mostrando una aceptable estimación cuantitativa.

1. INTRODUCCION

El aire moviéndose con altas velocidades puede ocasionar perjuicios a los suelos, la vegetación y los animales y deteriorar estructuras físicas.

Altas velocidades de viento serían responsables de una excesiva erosión de los suelos desprotegidos, provocando el arrastre de las partículas que lo componen (Wilson y Cooke, 1980). También, se observa que los animales buscan refugio cuando ocurren vientos fuertes. Esta reacción, constituye una respuesta a la incomodidad física causada por vientos fríos o cálidos o, simplemente, por la presión mecánica ejercida sobre los mismos. Esta incomodidad puede traducirse en una disminución en la calidad y productividad de los animales.

Por otra parte, velocidades altas de viento pueden provocar un aumento en la transpiración o daños mecánicos directos a las plantas. Es decir, ocasionar rupturas de las ramas de los árboles, producir el "vuelco" de los sembrados o provocar daños en la epidermis de las hojas.

Un método destinado a disminuir la velocidad del viento y, por lo tanto, su efecto perjudicial, consiste en la utilización de cortinas rompevientos.

Al interponer una cortina rompevientos en el flujo del aire, se producen modificaciones que no sólo afectan la velocidad del viento y las propiedades del suelo, sino también, inciden sobre otros parámetros meteorológicos. Con excepción de la radiación solar y la precipitación en las inmediaciones del rompevientos, las modificaciones en las variables meteorológicas, en las propiedades del suelo, en la evapotranspiración y en los animales y las plantas se deben, principalmente, a la variación de la velocidad del viento a sotavento de la cortina.

La disminución de la velocidad del viento, a sotavento de una

cortina, depende de su porosidad, su extensión y altura, de la estabilidad atmosférica y de las características aerodinámicas del terreno (van Eirmern y otros, 1964).

El objetivo de este trabajo de tesis es formular un modelo semi-empírico destinado a la obtención de la velocidad del viento, en un flujo atmosférico modificado por una cortina rompevientos. Mediante este modelo se podrá conocer, a partir de una mínima cantidad de parámetros, la eficiencia de la cortina y, de esta forma planificar y prever su efecto indirecto sobre los cultivos, la estabilización de los suelos y la evapotranspiración.

2. EFECTOS CAUSADOS POR EL VIENTO.

2.1 Generalidades.

Las modificaciones microclimáticas que se producen a sotavento de una cortina rompevientos, pueden provocar diferencias en el crecimiento y la productividad de los cultivos (Miller y otros, 1975; Zeljkovich y otros, 1976; Zeljkovich y Coca, 1979). Esto se debe a los cambios que se verifican en el ecosistema de los mismos, produciéndose modificaciones entre las zonas protegidas y desprotegidas, que influyen en los determinantes fisiológicos del rendimiento. Dada la complejidad de estos procesos, estas diferencias resultan difíciles de determinar, ya que hay que considerar el efecto que produce la cortina como un todo. Es decir, tener en cuenta las variaciones que se producen en el medio ambiente entre esas zonas como consecuencia de la modificación de la velocidad del viento (Rosemberg, 1966).

2.2 Efecto originado por el viento sobre las plantas

Una forma de determinar el efecto de la velocidad del viento sobre las plantas es a través de la resistencia de la capa límite que se forma alrededor de una hoja (ver Anexo I).

La resistencia de la capa límite de una hoja puede ser expresada mediante la siguiente ecuación (Monteith, 1973):

$$r = l/D SH \quad (1)$$

donde $SH = Fl/D(\chi_s - \chi)$ es el número de Sherwood, siendo F el flujo de masa, l la dimensión del objeto ubicado de cara frente a la velocidad del viento, D es el coeficiente de difusividad molecular, χ_s es la

concentración de la masa sobre la superficie y χ es la concentración de la masa por encima de la capa límite.

Para el caso de flujo de calor, r puede expresarse de la siguiente forma:

$$r = l / D \text{ Nu} \quad (2)$$

donde $\text{Nu} = Cl / c_p D (T_s - T_o)$ es el número de Nusselt, siendo C el flujo de calor, l la densidad del aire, c_p el calor específico a presión constante, D el coeficiente de difusividad molecular para el calor, T_s es la temperatura de la superficie de la hoja y T_o la temperatura del aire.

El efecto de la velocidad del viento sobre la resistencia de la capa límite de una placa plana puede ser obtenido utilizando el número de Reynolds ($R_e = ul/\nu$), donde u es la velocidad del viento y ν la viscosidad cinemática. Los números adimensionales Sh y Nu pueden expresarse como (ver Monteith, 1973):

$$Sh = 0.66 R_e^{1/2} (\nu/D)^{0.33} \quad (3)$$

$$Nu = 0.66 R_e^{1/2} (\nu/K)^{0.33} \quad (4)$$

donde K es la difusividad térmica.

Las expresiones (3) y (4) son aplicables en aquellos casos en que la capa límite es laminar. Sin embargo, el flujo sobre una hoja es, generalmente, turbulento y por lo tanto, para estimar Sh y Nu es necesario utilizar las siguientes expresiones (ver Monteith, 1973):

$$Sh = 0.03 R_e^{0.8} (\nu/D)^{0.33} \quad (5)$$

$$Nu = 0.03 R_e^{0.8} (\nu/K)^{0.33} \quad (6)$$

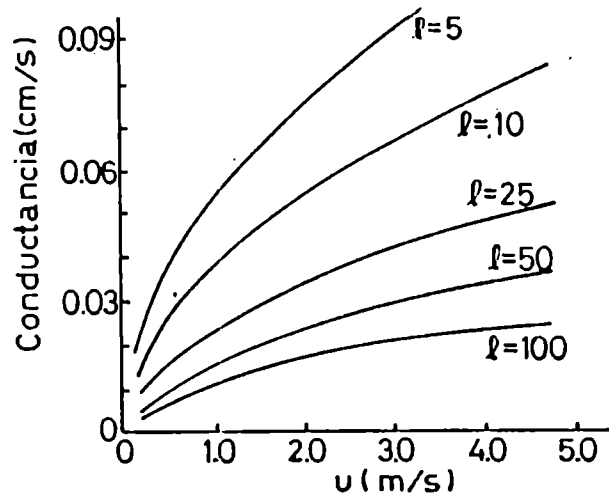


Fig. 1: Relación entre la conductancia de la capa límite de una hoja de diferentes dimensiones, l (mm) y la velocidad del viento.

En la Figura 1, se observa el efecto de la velocidad del viento sobre la conductancia o sea la inversa de la resistencia de la capa límite laminar generada sobre una hoja (ver Grace, 1981). Se nota que, para una dimensión (l) dada, la resistencia aumenta cuando la velocidad del viento disminuye. Sobre la vegetación el flujo del aire es turbulento. El coeficiente de transporte turbulento es alto y la resistencia al flujo de cantidad de movimiento bajo. Monteith (1973) y Thom (1975) encontraron, utilizando datos experimentales, la siguiente relación entre la resistencia y el transporte de cantidad de movimiento:

$$r = \frac{k}{u(z)} \ln(z - d_0) / z_0 \quad (7)$$

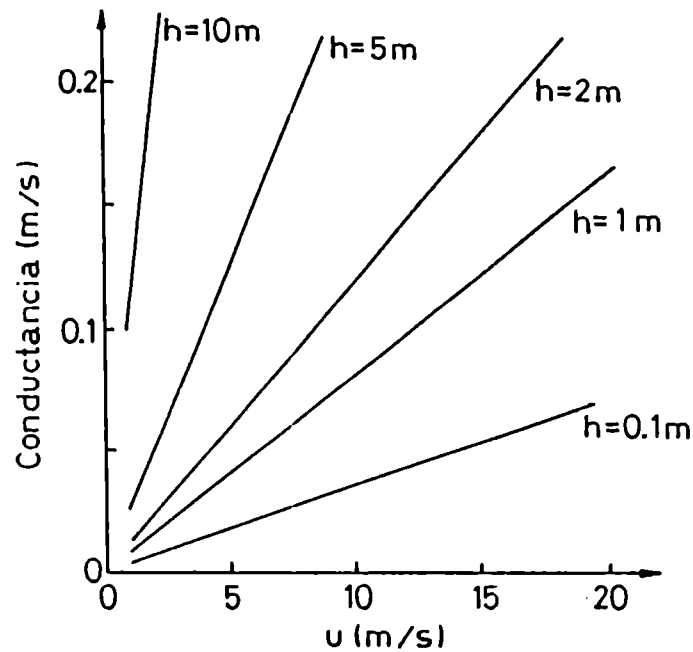


Fig. 2: Relación entre la conductancia de la capa límite de una hoja para diferentes alturas medias de la vegetación h (m) y la velocidad del viento.

donde d es el desplazamiento del plano cero, z_0 es la longitud de rugosidad y k es la constante de von Kármán. De la ecuación (7) se desprende que r , con d y z_0 fijos, es inversamente proporcional a la velocidad del viento.

En la Figura 2 se presenta, utilizando la ecuación (7) y suponiendo d y z_0 constantes, el efecto de la velocidad del viento sobre

la conductancia para vegetaciones de diferentes alturas.

En la capa límite turbulenta, la resistencia aerodinámica al flujo de cantidad de movimiento difiere sustancialmente de la resistencia a los flujos de gases y calor. Una de las causas de esto, es que el sumidero de cantidad de movimiento dentro de una cobertura vegetal está representado por todos los elementos de la estructura de las plantas. Las fuentes y los sumideros para el intercambio de gases y calor pueden no ser los mismos que para el caso anterior, ya que sólo pueden ser modificados por los procesos fisiológicos de las plantas. Cuando el aire se desplaza paralelamente sobre una hoja, el intercambio de cantidad de movimiento se produce por la fricción superficial, un proceso análogo a la difusión de calor y de los gases. Si por otra parte, la superficie de la hoja es perpendicular al flujo de aire, se produce un considerable intercambio de cantidad de movimiento ocasionado por la fuerza de arrastre sin un correspondiente aumento en el intercambio de calor y gases. El efecto neto resultante es que las fuentes o sumideros aparentes de calor y gases se producen en los niveles bajos de la cobertura vegetal, a diferencia del sumidero de cantidad de movimiento, lo que ocasiona que las resistencias aerodinámicas para los primeros sean mayores.

2.3 Efecto ejercido por el viento sobre contenido de agua en el suelo

Uno de los efectos más significativos que puede producir la utilización de cortinas rompevientos es la reducción de la evapotranspiración debido a la disminución de la velocidad del viento, determinando, por lo tanto, una mayor conservación del contenido de agua en el suelo.

El efecto del viento sobre la transpiración puede ser obtenido utilizando la ecuación de balance de calor (ver Monteith, 1965 ; Gate

y Papian, 1971; Rosemberg y otros, 1983) aplicada a una hoja:

$$H_t = R - G_s - S - P \quad (8)$$

o también

$$H_t = C + \lambda E \quad (9)$$

donde:

H_t es el flujo turbulento total de calor sensible y latente en el aire,

R es el flujo neto de radiación,

G_s es el flujo de calor en el suelo debido a la conducción,

S es el almacenamiento de calor,

P es la energía radiante utilizada en la fotosíntesis,

C es el flujo turbulento de calor sensible,

λ es el calor latente de vaporización a presión constante,

E es el flujo de vapor de agua.

En la ecuación (8), se pueden despreciar G , S y P comparados con los otros términos, resultando:

$$H_t = R = C + \lambda E \quad (10)$$

Utilizando la analogía entre la difusión de las diferentes propiedades con las resistencias eléctricas (ver Grace, 1977) se obtiene:

$$H_t = \frac{\rho C_p (T_h - T_a)}{r_H} + \frac{\rho C_p (e(T_h) - a)}{\delta (r_v + r'_z)} \quad (11)$$

donde: ρ es la densidad del aire,

c_p es el calor específico del aire a presión constante,

T_a y T_s son las temperaturas del aire y de la superficie de la hoja, respectivamente,

e_s y e son la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura T_s y la presión parcial del vapor de agua, respectivamente,

r_e' y r_v son las resistencias a la difusión del vapor de agua producida por los estomas y la capa límite de la hoja, respectivamente,

r_H es la resistencia al flujo de calor producida por la capa límite de la hoja,

$\gamma = 0.66 \text{ mb./}^\circ\text{C}$ es la constante psicrométrica.

De (11) se puede obtener una expresión para estimar E, resultando:

$$\lambda E = \frac{\Delta H_k + \rho c_p (e_s(T_s) - e)}{\Delta + \gamma^*} \quad (12)$$

donde Δ es el cambio de la presión de saturación dado por:

$$\Delta = \frac{\partial e_s(T)}{\partial T} \quad (13)$$

con $(e(T_s) - e)$ el déficit de saturación a la temperatura (T_s) de la superficie de la hoja y γ^* es la constante psicrométrica aparente correspondiente a la hoja, siendo una modificación de γ al considerarse la desigualdad existente entre las resistencias para el vapor de agua y el calor, como así también, la resistencia estomática. De esta forma γ^* se puede expresar de la siguiente manera:

$$\gamma^* = \frac{n \gamma (r_v + r'_e)}{r_H} \quad (14)$$

donde $n=1$ para hojas anfiestomáticas y $n=2$ para hojas hipoestomáticas.

En la expresión (12) puede observarse que la evaporación tiene una marcada dependencia con la energía disponible (generalmente energía radiante) y el déficit de saturación del vapor de agua en el aire. La influencia del viento sobre la evaporación es compleja, ya que las resistencias involucradas en la ecuación (14) dependen de la velocidad del viento (Grace, 1977).

Monteith (1973) puntualiza que la relación entre la velocidad del viento y la transpiración puede depender de la relación $\lambda E/C$. Si $\lambda E/C$ es mayor que $\Delta/n\gamma^*$, y si se produce un incremento de la velocidad del viento, E aumenta a expensas de la pérdida de calor sensible, de tal forma que $\lambda E + C$ permanezca constante. Es decir, la evaporación aumenta. Para pequeños valores de $\lambda E/C$, al incrementarse la velocidad del viento, aumenta C a expensas de E . Por lo tanto, hay una disminución de la evaporación.

Ya se ha mencionado que en algunos casos, la reducción de la velocidad del viento produce una disminución en la evaporación y, como consecuencia, se produce una mayor conservación del contenido de agua en el suelo. Sin embargo, este fenómeno puede determinar que las plantas desarrollen una mayor área foliar y extiendan más ampliamente sus raíces y, por lo tanto, requieran una mayor demanda de agua del suelo.

Jensen (1954) realizó mediciones del contenido de humedad del suelo entre zonas protegidas y zonas desprotegidas. En dos de esos experimentos, en la zona protegida no se verificaron diferencias en el

contenido de agua en el suelo. En el otro, se produjeron variaciones sólo en la estación de crecimiento.

Rosemberg(1966) encontró que no necesariamente la parcela protegida tendrá más agua disponible que la desprotegida, a pesar de producirse una reducción en la evapotranspiración potencial. Para poder explicar estas diferencias, realizó observaciones fisiológicas en un campo sembrado con habas. Sobre dos días de muestreo, encontró que los estomas en la parcela desprotegida tenían menor abertura que los ubicados en la zona protegida. Por otra parte, las mediciones de contenido de agua en la hojas mostraron que las plantas en la zona desprotegida sufrieron de tensión hídrica, a diferencia de las plantas ubicadas en la otra parcela. Aunque las mediciones no fueron continuas a lo largo de toda la vida del cultivo, se encuentra que las respuestas fisiológicas en el microclima de la parcela protegida pueden beneficiar a las plantas. Sin embargo, este beneficio no se reflejó en el rendimiento final, a pesar de que las plantas fueron más altas que en la parcela desprotegida.

Brown y Rosemberg (1971) realizaron observaciones más complejas del comportamiento de los estomas en un cultivo de remolacha azucarera protegidas por maíz. En general, observaron que las hojas tenían una mayor abertura estomática en la zona protegida. Esto, por lo tanto, se traduce en que la resistencia de los estomas fue menor en esta zona. Por otra parte, tanto en la parcela con abrigo como en la desprotegida, la resistencia estomática osciló considerablemente durante el día, pudiendo indicar que las plantas de remolacha sufrieron períodos de marchitez temporaria cuando las raíces no pudieron suministrar agua a la misma velocidad que la perdida por la planta a través de la transpiración. El resultado final de la experiencia demostró que, en el caso de la remolacha azucarera, se verificó un aumento del rendimiento en la zona protegida.

Frank y otros (ver Grace, 1977) investigaron para determinar las

diferencias entre el desarrollo de plantas de habas cultivadas en parcelas protegidas y sin proteger, Para tal fin, utilizaron dos parcelas una de las cuales fue irrigada y la otra conservada como tierra de secano. La irrigación fue realizada durante los períodos críticos de formación de vainas y llenado de granos. La mayor diferencia de rendimiento se produjo para el caso de la parcela irrigada, con un aumento del 25%. Esto podría ser causado por una mayor conductancia de los estomas y, por lo tanto, un aumento en el índice de fotosíntesis. En condiciones de secano, el efecto de protección sobre el estado de agua en la hoja no fue consistente ya que, algunas veces, las plantas desprotegidas presentaban mayor turgencia que las protegidas.

2.4 Influencia del viento sobre el intercambio de dióxido de carbono.

La influencia de la velocidad del viento sobre el intercambio máximo de dióxido de carbono (F_d) puede establecerse mediante la aplicación de la siguiente expresión (ver Grace, 1981):

$$F_d = \frac{Q_h - Q_a}{r_a + r_e + r_h} \quad (15)$$

donde Q_a y Q_h son, respectivamente, las concentraciones de dióxido de carbono en el medio ambiente y en el lugar donde se produce la carboxidación fotosintética y r_a , r_e y r_h son las resistencias al flujo de CO_2 producidas por la capa límite, los estomas y el interior de las hojas, respectivamente.

Grace (1977) aplica la ecuación (15) utilizando diferentes valores de resistencias para estimar la influencia del viento sobre la fotosíntesis (para lo cual se considera al CO_2 absorbido como índice de fotosíntesis). El resultado encontrado muestra que la velocidad del

viento tiene poca influencia sobre el intercambio de CO_2 , excepto en aquellos casos de bajas velocidades de viento, donde r_a puede ser más importante que $(r_e + r_h)$. En la atmósfera, esto no ocurre comúnmente, ya que no es frecuente que sobre un cultivo se produzcan muy bajas velocidades de viento (el gradiente térmico en una canopia genera movimientos de aire por convección)

2.5 Daños mecánicos en las plantas producidos por el viento

El daño causado por fuertes vientos puede ser muy perjudicial para la agricultura y la forestación. Comprender las causas por las cuales el viento ocasiona daños mecánicos a las plantas es un prerequisite para poder asegurar su crecimiento y desarrollo óptimo en zonas ventosas.

La fuerza del viento que actúa sobre cada planta que forma la cobertura vegetal puede obtenerse a partir del conocimiento del perfil vertical del viento y la distribución del área foliar dentro del cultivo (Grace, 1977). Para un nivel dado dentro de la cobertura vegetal, la fuerza que actúa lateralmente sobre una planta está representada por $1/2 \rho c_d u^2 a$, donde ρ es la densidad del aire, u y a son la velocidad del viento y el área foliar para una nivel dado y c_d es el coeficiente de arrastre producido por la hoja. De este modo la fuerza resultante es un torque que se ejerce en la base del tallo. Por otra parte, como consecuencia del desplazamiento que sufre el tallo de su centro de gravedad, se produce una torsión adicional.

El daño en la estructura de las plantas se produce cuando el torque total excede un valor crítico, a partir del cual el tallo se quiebra o la planta puede ser desarraigada. El valor crítico, a partir del cual la planta puede ser dañada, depende de la característica estructural de la planta y del tipo de suelo, es decir de la profundidad de las

raíces.

A partir del valor crítico de torsión que puede soportar una planta y estimando la velocidad del viento que produce ese valor dentro de la vegetación, es posible encontrar la velocidad crítica, que superada producirán daños estructurales a la vegetación. Sin embargo, esta condición no siempre se cumple. Tani (1963) y Fraser (1964) obtuvieron que el umbral de viento encontrado es mayor que el umbral real. Esto, se debe a que las plantas tienen una estructura elástica. Debido a ello hay que tener en cuenta las propiedades fluctuantes del viento, las que pueden ocasionar más daño que su velocidad media.

2.6 Efecto del viento sobre los suelos desnudos.

Uno de los efectos más perjudiciales del viento es la erosión eólica. La erosión es el proceso por el cual el viento recoge y transporta el material superficial que compone el suelo. Este proceso actúa sobre diversos ambientes naturales que carecen de una cobertura vegetal protectora, y es particularmente importante en los desiertos, tanto cálidos como fríos, en áreas con dunas costeras y en zonas montañosas. Pero las consecuencias socio-económicas más importantes de la erosión se producen en las áreas agrícolas con precipitación escasa, temperaturas y evaporación altas, fuertes vientos y mal manejo del suelo.

Dado que el agente erosionante es el viento, es importante conocer su acción sobre los materiales que componen el suelo. Los diferentes tamaños de las partículas que lo constituyen requerirán para ser transportadas diferentes velocidades de viento. La velocidad límite a partir de la cual comienzan a existir movimientos de partículas se la denomina velocidad umbral. Luego que las partículas son levantadas por acción del viento, la cantidad de movimiento que adquieren puede

dispersarse por diferentes mecanismos. Primero, las partículas pueden caer y rebotar nuevamente hacia el aire, por lo general, con una componente inicial de movimiento vertical o casi vertical. Este movimiento de rebote se denomina "saltación". En segundo lugar, el impacto de una partícula sobre una superficie de material suelto puede ser suficiente para que otras partículas sean puestas en movimiento, aunque la velocidad del viento no sea la crítica. El arrastre por impacto puede ocurrir a velocidades menores que la necesaria para iniciar el movimiento, denominándose velocidad umbral de impacto (ver Wilson y Cooke, 1980). Una tercera forma en que puede dispersarse la cantidad de movimiento es ocasionando la dispersión superficial de las partículas, es decir romper los agregados del suelo. Las partículas golpeadas pueden ser impulsadas hacia el sentido contrario del que recibieron el impacto, denominándose deslizamiento superficial.

La proporción de material transportado por los mecanismos de saltación y deslizamiento superficial varía, principalmente, con la velocidad del viento y la distribución del tamaño de las partículas.

Existen diferentes modelos para estimar la erosión eólica. El más sencillo de ellos fue desarrollado por Woodruff y Siddway (ver Wilson y Cooke, 1980), que proponen una analogía entre la pérdida de suelo por erosión hídrica y la erosión causada por el viento. Este modelo está basado en las características estructurales del suelo y en un factor climático. Dicho factor se basa en el principio de que la erosión varía directamente con el cuadrado de la velocidad del viento e inversamente con el cuadrado de la humedad del suelo.

3. MODIFICACION DEL FLUJO DEL AIRE POR LAS CORTINAS ROMPEVIENTOS

Una cortina rompevientos, es una estructura artificial o natural que reduce la velocidad del viento. Existen tres tipos principales de cortina rompevientos según su porosidad y características. En primer lugar se encuentran las cortinas de permeabilidad media, uniforme desde la superficie del suelo hasta su parte superior, luego están las cortinas densas o muy densas y por último, las de tipo callejas es decir, hileras de árboles altos sin ramas ni arbustos en su zona inferior.

Cuando al flujo de aire se le interpone una cortina rompevientos, la velocidad del viento se modifica a ambos lados de la misma. En los tres tipos de rompevientos mencionados, parte del aire penetra a través de ellas, mientras que otra porción de la corriente es obligada a dividirse por encima. Por lo tanto, como el flujo se ha bifurcado se forma, a sotavento de la cortina, una zona de menor velocidad del viento, hasta una distancia que depende de la porosidad y del tipo de cortina. Debido a esta separación del flujo, por encima del rompeviento, se produce un aumento en la velocidad del viento que determina la recomposición, del viento superficial hasta alcanza su valor original a una cierta distancia del mismo. En el caso de un rompevientos denso (Figura 3), como el aire prácticamente no lo penetra, se produce a sotavento, una disminución de la presión atmosférica, que provoca la formación de torbellinos grandes e irregulares posibilitando, por lo tanto, un aumento del flujo vertical de cantidad de movimiento. Este aumento, contribuye a la reconstitución de la velocidad del viento superficial a su valor original a una distancia aproximada entre 15 y 20H (H altura de la cortina).

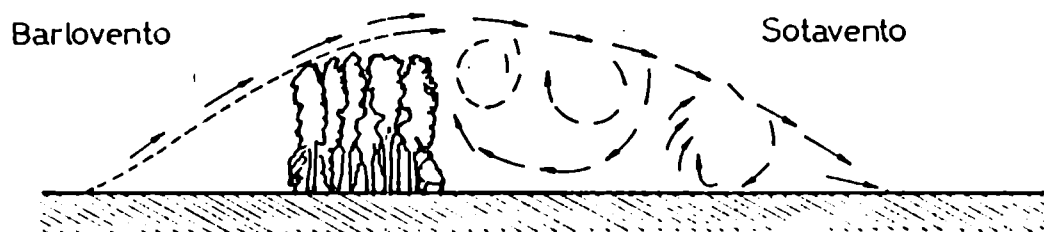


Fig. 3: Representación esquemática del efecto sobre el flujo de una cortina rompevientos "denso".

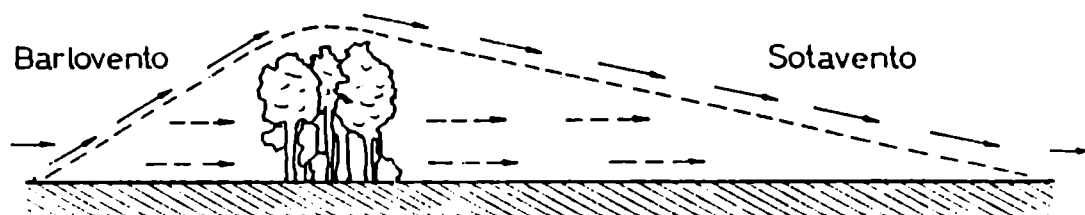


Fig. 4: Representación esquemática del efecto sobre el flujo del aire de una cortina rompevientos de permeabilidad media.

Si la cortina rompevientos es de permeabilidad media (Figura 4), como consecuencia de que parte del flujo penetra en ella, en la parte superior de la misma se produce un menor aumento de la velocidad del viento, el flujo vertical de cantidad de movimiento es menor y por lo tanto, la velocidad del viento se restituye a una distancia mayor que en el caso de una cortina densa. Es decir, el área de protección es mayor, pudiendo llegar hasta una distancia comprendida entre 20 y 25H.

En la Figura 5 se observa el efecto de cortinas rompevientos de diferentes porosidades sobre la velocidad del viento. La ordenada corresponde a los valores de velocidad relativa $u' = u_x / u_0$, donde u_0 es la velocidad del viento a una distancia de $10H$ a barlovento de la cortina y a la altura z y u_x es la velocidad del viento a sotavento y a la misma altura.

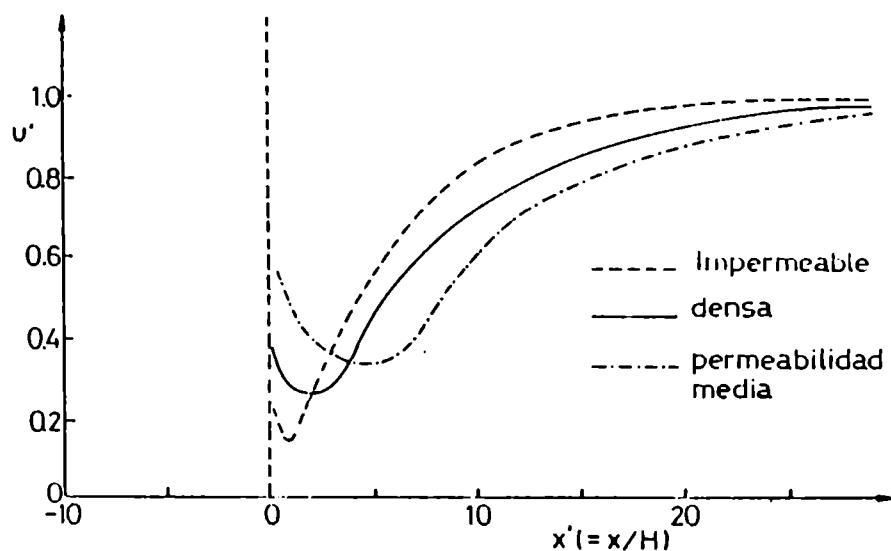


Fig. 5: Efectos de cortinas rompevientos de diferentes porosidades sobre la velocidad del viento (ver van Eimern, 1964).

Cuando la cortina rompevientos es casi "impermeable", la máxima reducción del viento se produce a una distancia de la cortina de aproximadamente $1H$ a sotavento (Figura 6), a partir de la cual la velocidad del viento aumenta rápidamente hasta alcanzar su magnitud inicial. En el caso de una cortina de "permeabilidad media", la reducción máxima del viento se verifica a una distancia ubicada entre $5-6H$ (Figura 7) produciéndose, luego, un aumento progresivo de la velocidad del viento hasta alcanzar su valor a barlovento. Por último, en las cortinas de tipo callejas, debido a las brechas existente entre los troncos de los árboles, una parte importante del flujo pasa por su parte inferior. Por lo tanto, la velocidad del viento superficial puede ser mayor en esa zona adyacente. Sin embargo, la zona de reducción del

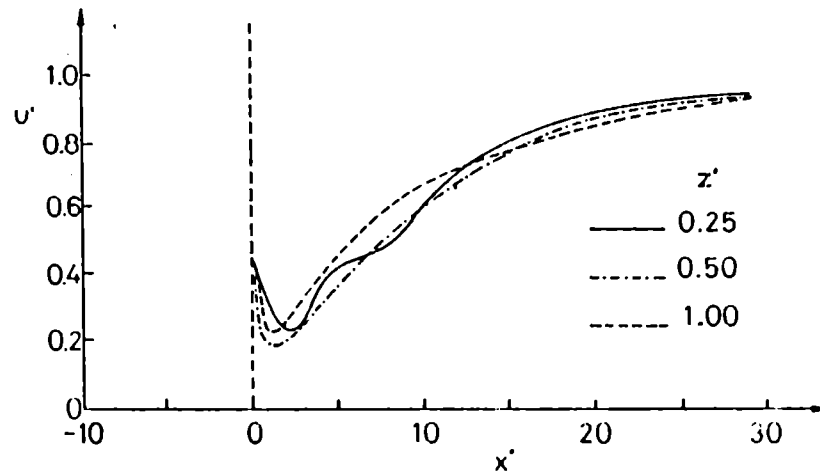


Fig. 6: Velocidad relativa del viento (u') a diferentes alturas (z') y distancias (x') debido al efecto de una cortina rompevientos denso ($15\% \leq P \leq 25\%$) (ver van Eimern, 1964)

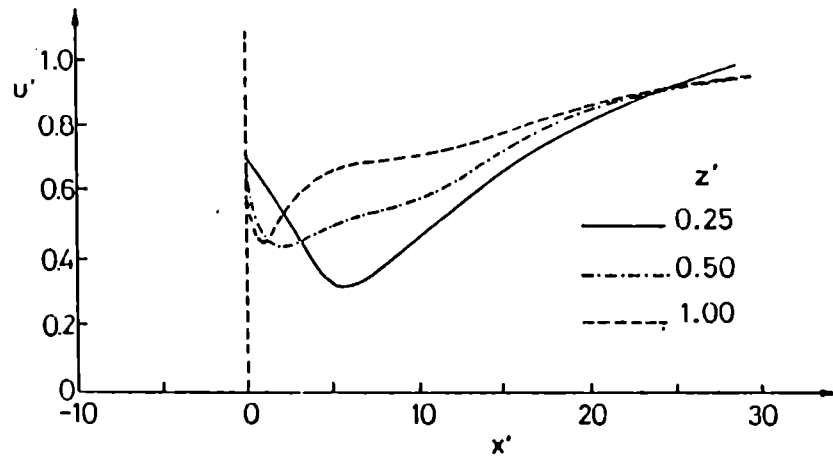


Fig. 7: Velocidad relativa del viento (u') a diferentes alturas (z') y distancias (x') debido a una cortina rompevientos de permeabilidad media ($45\% \leq P \leq 55\%$) (ver van Eimern, 1964).

viento es, por lo general, más amplia debido a los pequeños torbellinos que se forman en su parte superior. La máxima reducción del viento se produce a una distancia entre 6 y $12H$ (Figura 8) y es, por supuesto, menor que la producida por otros tipos de cortinas.

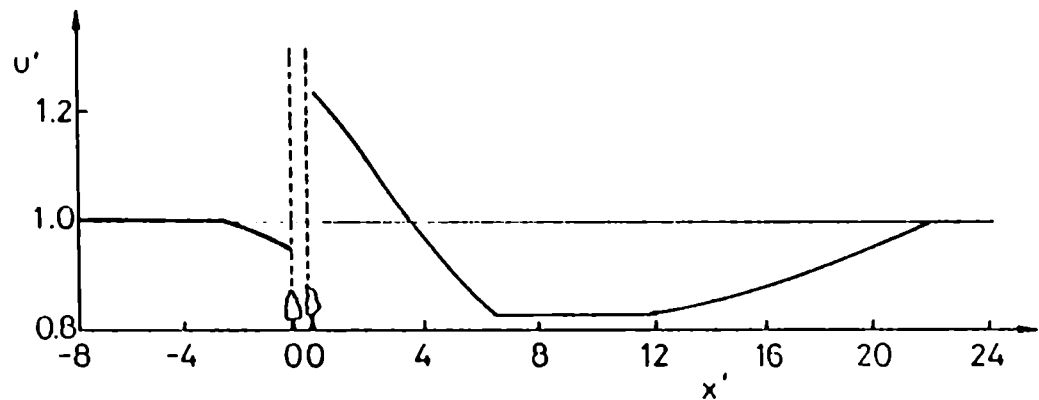


Fig. 8: Efecto sobre la velocidad del viento de una cortina rompevientos del tipo calleja (ver van Eijmer, 1964).

El comportamiento del flujo de aire alrededor de una cortina rompevientos es complejo. Un esquema simplificado del mismo se presenta en la Figura 9. En la misma pueden distinguirse cuatro zonas en donde el flujo tiene diferente comportamiento. La zona 1 corresponde a la región donde el flujo no es perturbado por la presencia de la cortina rompevientos. Es aquella región donde se puede considerar válido el perfil logarítmico del viento. La zona 2, corresponde a la región donde el flujo es perturbado por la cortina cuya influencia comienza a una distancia x_0 a barlovento y llega hasta una distancia x_1 a sotavento, a partir de la cual comienza la zona 3 donde el flujo se reconstituye totalmente. Por otra parte, dentro de la zona 2 se puede distinguir una zona 4 que corresponde a aquella donde la cortina

rompevientos tiene su máxima influencia, ya que es la zona donde existe mayor turbulencia. Esta última zona es la región de estudio del presente trabajo.

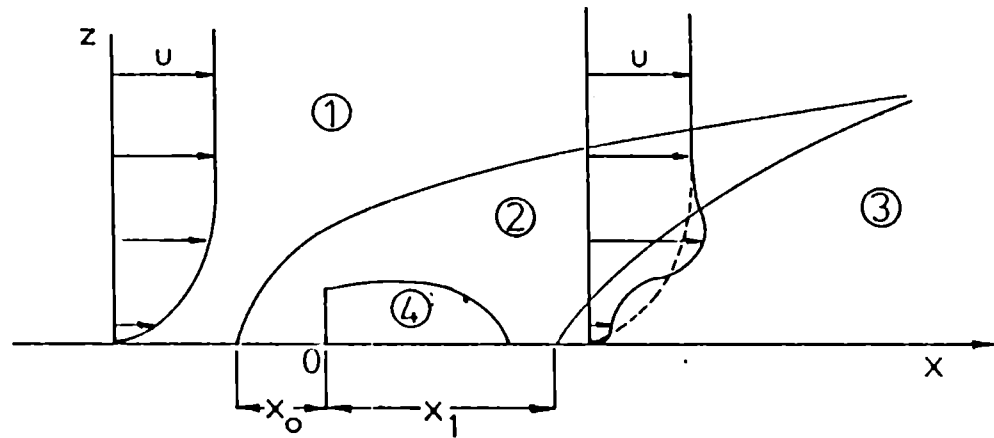


Fig. 9: Representación esquemática de los efectos de una cortina rompevientos sobre el flujo del aire.

4. MODELOS DE SIMULACION DEL FLUJO DEL AIRE OBSTACULIZADO POR UNA CORTINA ROMPEVIENTOS

La efectividad de una cortina rompevientos está determinada por la fuerza de arrastre que ejerce sobre el flujo del aire y por el déficit de la cantidad de movimiento que la misma fuerza genera. Diferentes factores aerodinámicos afectan tanto a una como a otra. Las características del flujo en la capa límite y la forma y porosidad de la cortina son algunos de esos factores (Plate, 1971).

Woodruff y otros(1963) proponen un método para calcular la fuerza de arrastre ejercida por una cortina rompevientos. Un esquema de la propuesta se presenta en la Figura 10 (ver Seginer y Sagi, 1972), donde U es la velocidad media del flujo del aire fuera de la influencia de la superficie, u_1 y p_1 son la velocidad del viento y la presión a la distancia x_1 a barlovento de la cortina, u_2 y p_2 son la velocidad y la presión a una distancia x_2 a sotavento, respectivamente. En la Figura se observa una superficie de control, constituida por dos planos verticales ubicados entre x_1 y x_2 y un plano horizontal en el nivel z_t (límite de la capa límite planetaria). Si se supone que no existe flujo neto a través del límite superior y que $du/dz = 0$ en el nivel z_t , y no existe flujo horizontal de cantidad de movimiento dentro del volumen control, se infiere que:

$$\int_0^{z_t} u_1 dz = \int_0^{z_t} u_2 dz \quad (16)$$

En estas condiciones, la ecuación de balance de las fuerzas horizontales sobre el volumen control puede escribirse de la siguiente forma:

$$\int_0^{z_t} (p_1 - p_2) dz + \rho \int_0^{z_t} (u_1^2 - u_2^2) dz = D_c + G \quad (17)$$

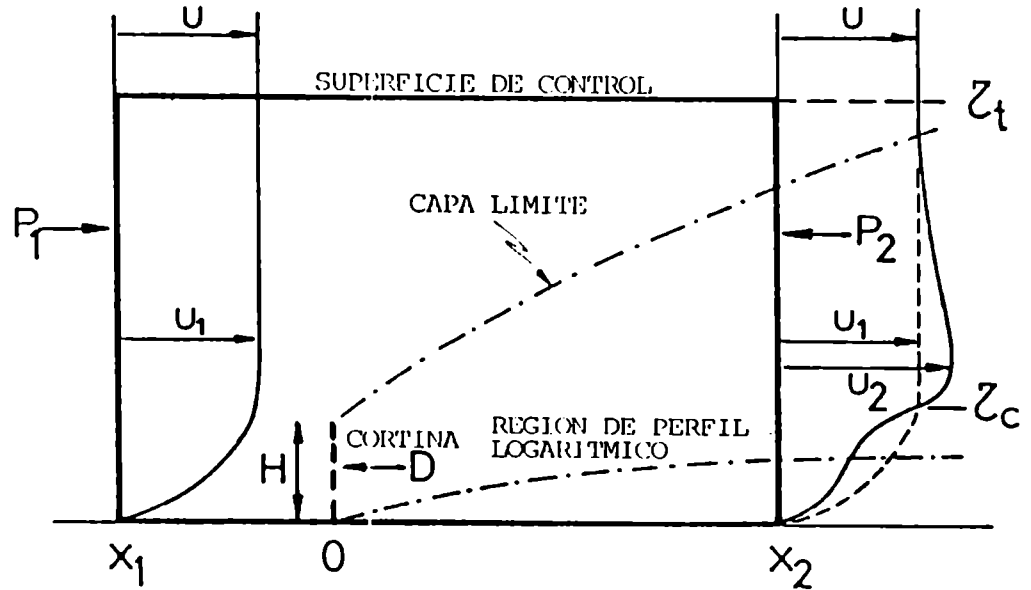


Fig. 10: Representación esquemática con modificaciones del modelo desarrollado por Woodruff y otros (1963) (ver Seginer y Sagi, 1972).

donde ρ es la densidad del aire, G es la fuerza de arrastre friccional sobre la superficie terrestre entre x_1 y x_2 y D_c es la fuerza de arrastre originada por la barrera, ambas por unidad de altura.

Suponiendo que G puede ser determinada independientemente, Woodruff y otros (1963) propusieron que es posible calcular D_c conociendo la variación de la presión y la velocidad en x_1 y x_2 . En la Figura 10 se observa que $u_1 < u_2$ por debajo del nivel z_c y que $u_1 > u_2$ por encima de este nivel. Esto implica que $\rho \int_0^{z_t} (u_1^2 - u_2^2) dz < 0$, y por lo tanto:

$$\int_0^{z_t} (P_1 - P_2) dz > D_c + G \quad (18)$$

De esta forma, puede inferirse que la diferencia de presión entre x_1 y x_2 no es despreciable.

Woodruff y otros (1963) aplicaron la ecuación (17) a observaciones obtenidas mediante experimentos en un túnel de viento. Ellos concluyeron que los datos obtenidos en laboratorio pueden ser utilizados satisfactoriamente para evaluar la eficiencia de una cortina rompevientos a partir del cálculo del coeficiente de arrastre y que éste, puede ser calculado conociendo el perfil vertical de la velocidad del viento a sotavento y barlovento de la cortina.

Seginer y Sagi(1972) presentaron otro modelo válido para un flujo bidimensional, incompresible y turbulento. Consideran una capa límite atmosférica originada sobre una superficie homogénea (Figura 11) que se extiende en la dirección del viento, con un espesor varias veces mayor que la altura de una cortina rompevientos (la altura de la capa límite interna puede llegar hasta 10 veces la altura del rompevientos) incorporando el efecto de la cortina sobre el perfil de velocidad del viento, que se manifiesta hasta cuatro veces la altura de la cortina. Por razones de simplicidad los autores consideraron que, en ausencia de la cortina, el perfil del viento es logarítmico. Ubicaron una superficie control a partir de una cierta distancia de la cortina, de tal forma que en x_1 y x_2 el perfil del viento sea el mismo ($u_1 = u_2 = u_o$) y se cumpla:

$$u_o = \frac{u_{*o}}{k} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (19)$$

donde u_{*o} es la velocidad de fricción en la región donde el flujo no es modificado por la cortina, z_o la longitud de rugosidad y k la constante de von Kármán (ver Panofsky y Dutton, 1984).

Si la superficie de control está completamente sumergida en la capa de flujo constante, las tensiones horizontales de corte que actúan sobre la parte superior y sobre las paredes laterales son expresadas por (Figura 12) :

$$\tau_o = \int \mu_{*o}^2 \quad (20)$$

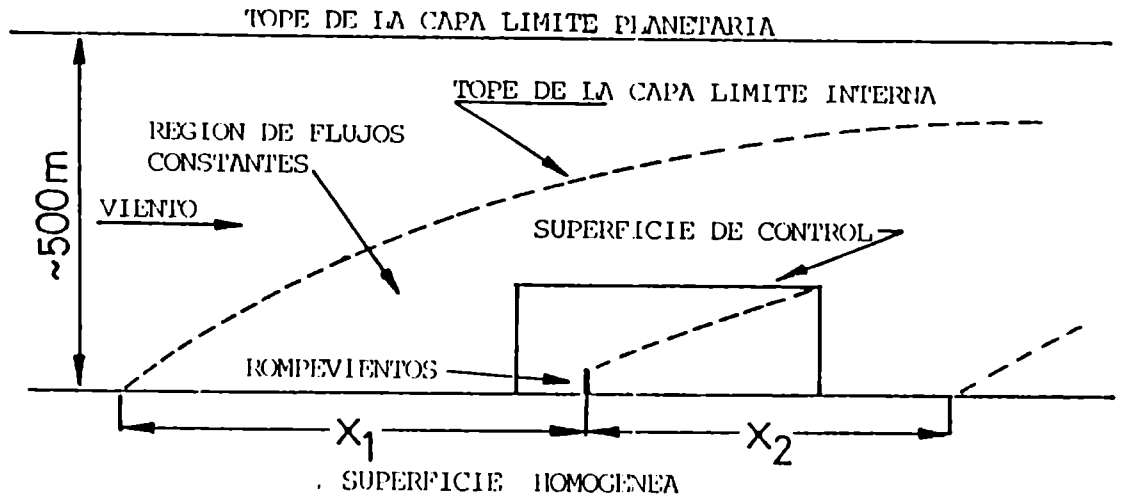


Fig. 11: Ubicación de la superficie de control dentro de la capa límite atmosférica que se desarrolla por efecto de una cortina rompevientos sobre una superficie homogénea (Seginer y Sagi, 1972).

Si se supone que p_1 y p_2 son constantes a lo largo de las paredes y que el gradiente de presión en la dirección horizontal es constante, el balance de las fuerzas horizontales puede ser expresado de la siguiente forma:

$$(p_1 - p_2) z_t + \int_{x_1}^{x_2} (\tau_0 - \tau) dx - D_c = 0 \quad (21)$$

y el de las fuerzas verticales mediante:

$$\int_{x_1}^{x_2} p dx - (x_1 - x_2) \frac{1}{2} (p_1 + p_2) = 0 \quad (22)$$

Asimismo, el balance de la cantidad de movimiento en el punto P

(ver figura 12) puede ser descripto por:

$$\int_{x_1}^{x_2} (p_1 - p_2) x dx - N = 0 \quad (23)$$

donde p_c y p son las presiones en la parte superior y en la superficie respectivamente, τ es la tensión de corte sobre la superficie y M es la fuerza determinada por la cantidad de movimiento.

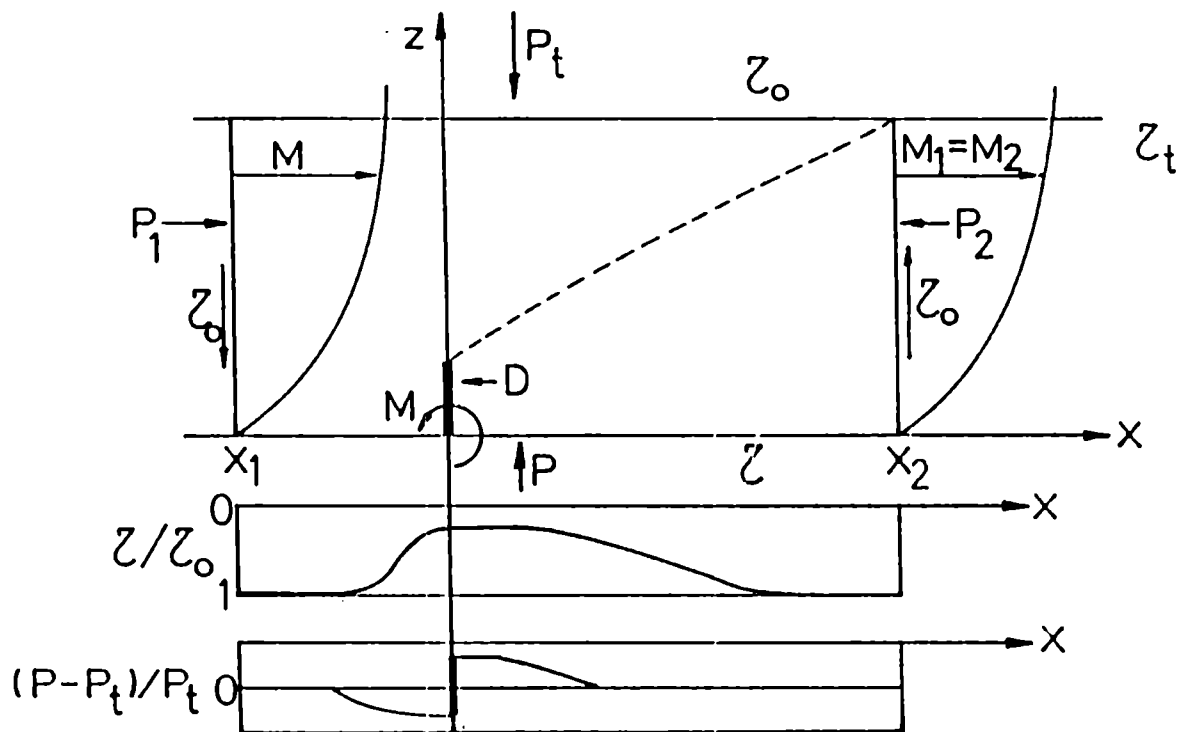


Fig. 12: Representación esquemática de la superficie de control incluida en la Figura 11 y de las tensiones que ejerce el flujo del aire sobre sus caras (Seginer y Sagi, 1972).

Si se supone que $p_1 = p_2 = p_c = p_o$, las ecuaciones (21) a (23) se reducen a:

$$\int_{x_1}^{x_2} (\tau_o - \tau) dx = D_c \quad (24)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} (p_o - p) dx = 0 \quad (25)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} (p_o - p) x dx = M \quad (26)$$

Por lo tanto, conociendo τ_o y p y la distribución de τ y p a lo largo de la superficie, aplicando las ecuaciones (24) y (26) se pueden obtener M y D_c .

En condiciones de neutralidad atmosférica, el perfil de la velocidad del aire cerca de la superficie y a barlovento de una cortina (Figura 10), satisface la ecuación:

$$u_x = \frac{u_{*o}}{k} \ln \frac{z}{z_o} \quad (27)$$

Por lo tanto, combinando (19) y (27), se encuentra:

$$u' = \frac{u_x}{u_o} = \frac{u_*}{u_{*o}} \quad (28)$$

A partir de las expresiones (20) y (28) y, conociendo el campo de velocidades pueden obtenerse las tensiones de corte (τ) sobre la superficie mediante:

$$\tau_0 = \int \mu_{\neq 0}^2 \mu' \quad (29)$$

Reemplazando (29) en (24), se obtiene:

$$D_c = \int \mu_{\neq 0} H \int_{x'_1}^{x'_2} (1 - \mu'^2) dx' \quad (30)$$

donde se introdujo una distancia adimensional $x' = x/H$ con x la distancia a la cortina y H la altura de la misma.

Para obtener el coeficiente de arrastre (C_D) sobre la superficie del suelo se divide la fuerza de arrastre superficial (D_c) por la presión dinámica ($1/2 \rho u_c^2 H$), basada en la velocidad característica del sistema (u_c) y por la altura de la cortina. La expresión general del coeficiente arrastre resulta:

$$C_D = \frac{D_c}{1/2 \rho u_c^2 H} \quad (31)$$

Plate (1971) propone considerar u_c como la velocidad característica del sistema. Por lo tanto, combinando (30) y (31) resulta:

$$C_D = 2A \quad (32)$$

donde:

$$A = \int_{x'_1}^{x'_2} (1 - \mu'^2) dx' \quad (33)$$

Seginer y Sagi (1972) proponen utilizar como velocidad característica la velocidad media del viento al nivel H , obtenida a partir del perfil logarítmico del viento. Luego, resulta:

$$C_{DH} = \frac{2 K^2 A}{(\ln H/z_o)^2} \quad (34)$$

Para una barrera ubicada sobre una superficie aerodinámicamente lisa, Good y Joubert (1968) encontraron que C_D depende sólo de un número de Reynolds particular (Hu_{x0}/ν) , donde ν es la viscosidad cinemática del aire. En una superficie rugosa, el efecto de ν se hace despreciable, mientras que la rugosidad comienza a tener mayor efecto.

Seginer y Sagi (1972) aplicaron las ecuaciones (30), (32) y (34) a datos obtenidos en experiencias de campo por Woodruff y otros (1963) y Nageli (ver van Eirmern y otros, 1964) y por Jensen (1954) en un túnel de viento. Los valores de C_D calculados no fueron fácilmente comparables entre sí, ya que los datos fueron obtenidos con cortinas rompevientos de diferentes porosidad, geometría y elasticidad. Por otra parte, también, fueron comparados con valores de C_D obtenidos en túneles de viento por Hoerner (ver Seginer y Sagi, 1972), Good y Joubert (1968) y Meroney (1968). De la comparación de los resultados, se desprende que los valores obtenidos por el modelo propuesto, son menores que los medidos. Esto, según los autores, no invalida la bondad del modelo ya que los datos experimentales adolecen de deficiencias en los sistemas de medición. Por lo tanto, concluyen que el método presentado puede proveer un adecuado marco de referencia para el diseño de cortinas rompevientos.

Otros autores, también, han estudiado el efecto de las cortinas

rompevientos sobre el flujo del aire. Entre ellos, Nageli (ver van Eirmern, 1964), Rosenberg (1966), Hagen y Skidmore (1971), Hagen y otros (1981), Maki (1980, 1982), Wilson (1985, 1987).

Hagen y otros (1981), desarrollan una simulación del flujo del aire normal a una cortina rompevientos de diferentes porosidades. Este modelo, fue elaborado suponiendo un flujo bidimensional y estacionario y un fluido incompresible. En estas condiciones, el flujo perpendicular a una barrera puede ser descripto por las ecuaciones de movimiento de Navier-Stokes (ver Wiin-Nielsen, 1974):

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial^2 (\mu u)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\mu u)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \quad (35)$$

v

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial^2 (\mu w)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 (\mu w)}{\partial x^2} \quad (36)$$

donde u es la componente de la velocidad media del viento en la dirección x , w es la componente vertical de la velocidad del aire, μ es la viscosidad dinámica del fluido, p es la presión y ρ es la densidad del aire.

En el sistema de ecuaciones (35) y (36) hay tres incógnitas (u , w y p). Por lo tanto, es necesario una tercera ecuación para cerrar el sistema. Hagen y otros (1981) utilizaron para ello la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (37)$$

Las ecuaciones (35)-(37) describen un fluido en estado laminar. Sin embargo, generalmente, la capa límite atmosférica se encuentra en estado turbulento. Luego, las incógnitas u , w y p pueden considerarse representativas del flujo medio y μ puede ser una viscosidad efectiva (μ_t) para el flujo turbulento. Hagen y otros (1981) proponen la siguiente expresión para representar μ_t :

$$\mu_t = \rho C_\mu K^2 / \epsilon \quad (38)$$

donde C_μ es una constante, K es la energía cinética turbulenta y ϵ es la disipación de energía turbulenta. Launder y Spalding (1972) obtienen K a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, resultando:

$$\rho \left(u \frac{\partial K}{\partial x} + w \frac{\partial K}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_K \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_K \frac{\partial K}{\partial z} \right) + S_K \quad (39)$$

donde T_K es el coeficiente de intercambio efectivo de la energía turbulenta, $T_K = \mu_t / \sigma_K$, siendo σ_K el número de Prandtl de difusión de la energía turbulenta, S_K es el término de creación y destrucción de la energía turbulenta y se puede expresar como:

$$S_K = \rho \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \epsilon \right] \quad (40)$$

donde, $\rho \mathcal{E}$ tiene la siguiente forma:

$$\int \mathcal{E} = \mu_t \left[\overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w'}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w'}{\partial z} \right)^2} \right] \quad (41)$$

Las primas indican valores instantáneos.

La ecuación para la cantidad de movimiento puede ser derivada del término de disipación, y resulta:

$$\int \left(u \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + w \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \mathcal{E} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T \mathcal{E} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \right) + \delta \mathcal{E} \quad (42)$$

donde $\delta \mathcal{E}$ se expresa como:

$$\delta \mathcal{E} = C_\mu \left(\frac{\mathcal{E}}{K} \right) \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \right] \quad (43)$$

El coeficiente de intercambio efectivo de disipación turbulenta (\mathcal{E}), se obtiene mediante $T_{\mathcal{E}} = \mu_t / \sigma_{\mathcal{E}}$, donde $\sigma_{\mathcal{E}}$ es una constante.

El sistema de ecuaciones (35) a (43) constituye un modelo de simulación del efecto de un rompevientos sobre el flujo del aire.

Hagen y otros (1981) consideraron las siguientes condiciones límites en el tope y a barlovento de una cortina (Figura 11):

$$\begin{aligned} u/u_x &= 1/k \ln(z/z_0) \\ w &= 0 \end{aligned}$$

$$p = 0$$

$$k/u_x^2 = C \mu^{0.5}$$

$$E/u_y^3 = (kz)^{-1}$$

Para poder aplicar el sistema de ecuaciones (35)-(43), es necesario efectuar algunas aproximaciones.

En la ecuación de la cantidad de movimiento, el término $(\mu_t \frac{\partial u}{\partial z} - \rho w u) \Big|_S$ se puede aproximar de la siguiente manera:

$$\left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial z} - \rho w u \right) \Big|_S \cong \frac{\rho C \mu^{1/2} K_P}{1/K \ln(z_P/z_0)} \mu_P \quad (44)$$

donde P es un punto cercano a la superficie S.

En la ecuación de la componente w de la cantidad de movimiento $(\mu_t \frac{\partial w}{\partial z} - \rho w w) \Big|_S = 0$. Luego:

$$\begin{aligned} \left[\iint \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dz \right] \Big|_P &\cong \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)} \Big|_P \Delta x \Delta y \Delta z \\ &\cong \frac{\overline{\mu_P} \Delta x \Delta y}{z_P \ln(z_P/z_0)} \end{aligned} \quad (45)$$

Otra aproximación utilizada en la ecuación de energía turbulenta es la siguiente:

$$\frac{C \rho^{1/2} K_P \Delta x \Delta y}{\mu_t} \Big|_P \cong \frac{\rho C \mu^{3/4} K_P^{1/2} \Delta x \Delta y}{h z_P} \quad (46)$$

Los términos de producción y destrucción de energía turbulenta en el punto P, puede suponerse en estado de equilibrio. Por lo tanto, ϵ_P puede obtenerse a partir de la siguiente relación:

$$\epsilon_P = \frac{C_N^{3/4} K_P^{3/2}}{k z_P} \quad (47)$$

Hagen y otros (1981) aplicaron el modelo propuesto a datos observacionales obtenidos en experiencias de campo. Los experimentos se llevaron a cabo sobre un campo con césped, en el cual se instalaron cortinas rompevientos de 1.22 metros de alto ($H = 1.22$ m), 50 metros de longitud y porosidades iguales a 20, 40 y 60%. La velocidad del viento se midió con anemómetros de copelas en $z = 0.25H$, $0.5H$ y $1H$ y en $x = 2, 4, 6, 8$ y $12H$.

En la Figura 13 se encuentran graficados los valores obtenidos por el modelo y los observados. De la comparación presentada se encuentra que, en general, el modelo efectúa una estimación cuantitativa razonable. Sin embargo, para el caso del 60% de porosidad los valores estimados fueron mayores que los medidos, excepto para $2H$, siendo el error medio porcentual del 22%. La mayor discrepancia entre los valores calculados y observados se produce a una distancia de $2H$ para el caso de las cortinas rompevientos de 20% de porosidad generando el modelo valores negativos y un error relativo medio del 22%. El menor error relativo medio (4%) se produce cuando la porosidad es del 40%. Los autores, también, compararon el modelo con datos observacionales obtenidos por Hagen y Skidmore (1971) y Raine (1974).

Hagen y Skidmore (1971) usaron cortinas rompevientos de 2.44 metros de altura ($H = 2$ m), 60 metros de longitud y porosidades de 20, 40 y 60%. Las mediciones de la velocidad del viento se realizaron con anemómetros de copelas colocados en $z = 0.5H$ y $1H$ a las distancias de

5, 12, y 20H a sotavento de la cortina.

Raine (1974) obtuvo datos observacionales en un túnel de viento. En la experiencia utilizó cortinas rompevientos de diferentes porosidades (20, 34, y 50%) y las mediciones de la velocidad del viento se realizaron en $z = 0.5H$ y $1H$.

En la Figura 14 se encuentran graficados los valores obtenidos por el modelo y los observados para el caso de porosidad del 20% y $z = 0.5H$ y $1H$. Se observa que en el caso de $z' = 0.5$, los valores calculados estiman la velocidad relativa con un error relativo medio del 13%. Para $z' = 1$, los valores obtenidos por el modelo difieren significativamente de los datos experimentales, cometándose un error relativo medio del 39%. Para el caso de 40% de porosidad y $z' = 0.5$ y 1 (Figura 15), los valores calculados difieren notoriamente de los observados. En el caso de $z' = 0.5$ el error relativo medio es del 16% y para $z' = 1$ es del 45%. En la Figura 15 se encuentran graficados los datos observacionales correspondientes a una porosidad del 34% (Raine, 1974). Estos datos, sin embargo, no pueden ser comparados con los obtenidos por el modelo, ya que fueron calculados suponiendo una porosidad del 40%. La Figura 16, correspondiente a una cortina rompevientos de 60% de porosidad cuando $z' = 0.5$ y 1 , puede observarse que las diferencias entre los valores calculados y observados difieren significativamente, produciéndose en la estimación errores relativos medios del 20% para $z' = 0.5$ y del 17% para $z' = 1$. En este caso, como en el anterior, los autores graficaron los datos observacionales obtenidos por Raine (1974) correspondientes a una porosidad del 50%, no pudiendo ser comparados con los datos obtenidos con el modelo que supone una porosidad del 60%.

Wilson (1985) presenta la parametrización del efecto de una cortina rompevientos sobre el flujo del aire, utilizando la ecuación de movimiento e incluyendo, además, una ecuación de sumidero de cantidad de movimiento debido a la cortina rompeviento. En la

resolución numérica del modelo propone tres hipótesis de cierre:

a. Las tensiones de Reynolds se relacionan con el gradiente de velocidad media a través de la viscosidad turbulenta $K(x,z) = K(0) = 0.4u_{x_0} z$, donde u_{x_0} es la velocidad de fricción a barlovento de la cortina.

b. La viscosidad turbulenta se obtiene a partir de la energía turbulenta y el coeficiente de disipación de energía turbulenta. Esta hipótesis de cierre, también, fue utilizada por Hagen y otros (1981).

c. El sistema de ecuaciones se cierra utilizando una aproximación de las ecuaciones de transporte turbulento y la disipación de energía cinética turbulenta.

Wilson (1985) aplicó las tres hipótesis de cierre a datos experimentales obtenidos por Bradley y Mulhearn (ver Wilson 1985) en un túnel de vientos. En la experiencia se utilizó una cortina rompaviento de 50% de porosidad construída con varillas de madera. En la Figura 17, se encuentran graficados los valores obtenidos con las tres hipótesis de cierre y los datos observacionales. Del análisis de la misma, Wilson concluye que la hipótesis b es la que mejor estima el efecto de una cortina rompavientos sobre el flujo del aire.

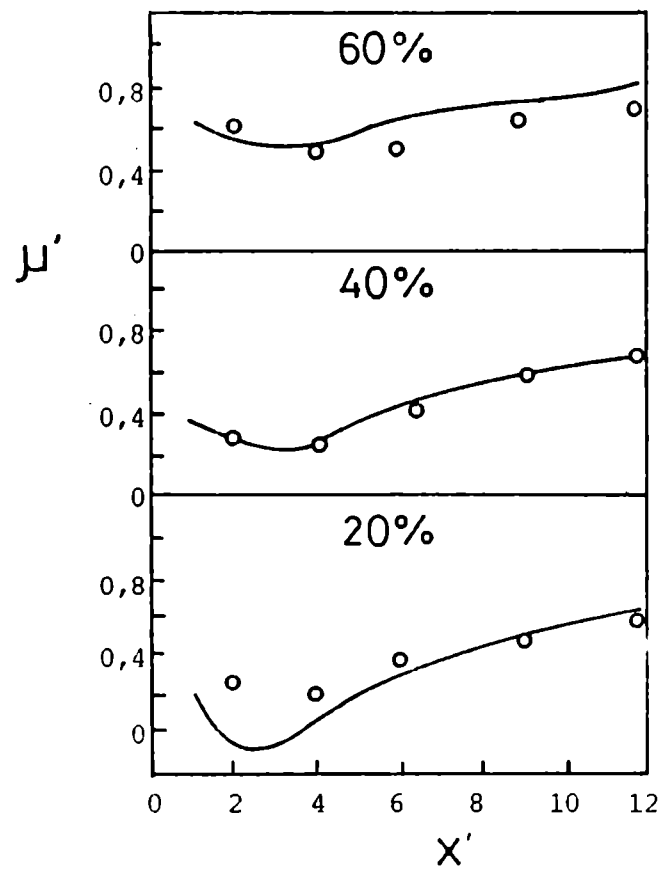


Fig. 13: Comparación entre las velocidades (u') calculadas (—) por el modelo desarrollado por Hagen y otros (1981) y observadas (Δ) para $z' = 0.25$.

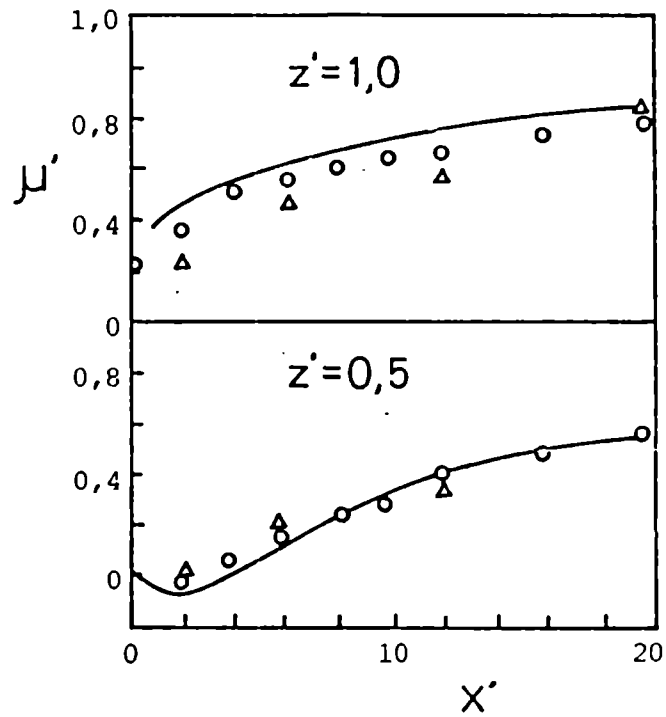


Fig. 14: Comparación entre las velocidades (u') calculadas (—) por el modelo desarrollado por Hagen y otros (1981) y observadas (Hagen y Skidmore (1971): Δ ; Raine (1974): \circ) para $P = 20\%$ y $z' = 1.0$ y 0.5 .

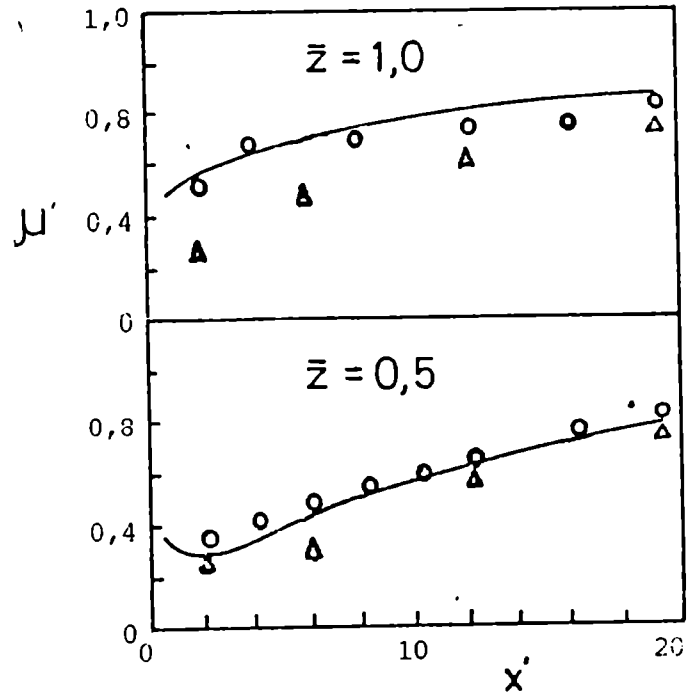


Fig. 15: Comparación entre las velocidades (u') calculadas (—) por el modelo desarrollado por Hagen y otros (1981) y las observadas (Hagen y Skidmore (1971): Δ ; Raine (1974): \circ).

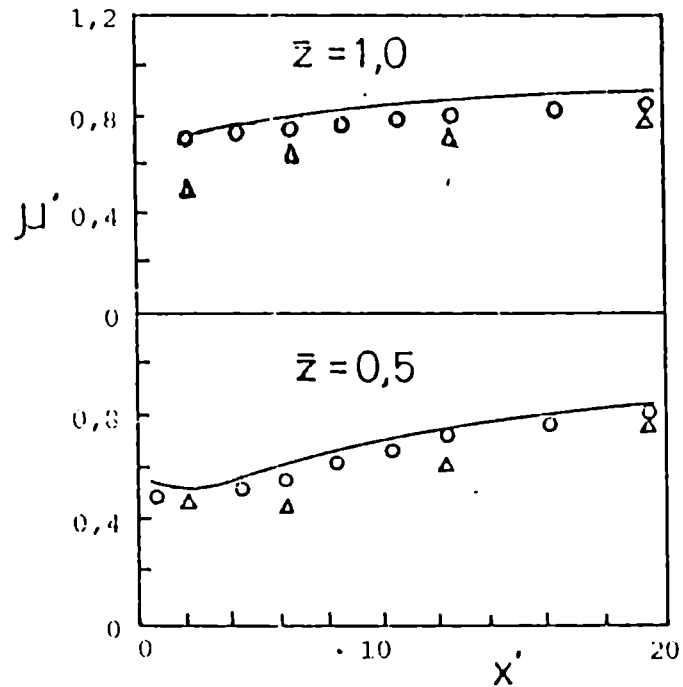


Fig. 16: Comparación entre las velocidades (u') calculadas (—) por el modelo desarrollado por Hagen y otros (1981) y las observadas (Hagen y Skidmore (1971): Δ ; Raine (1974): \circ).

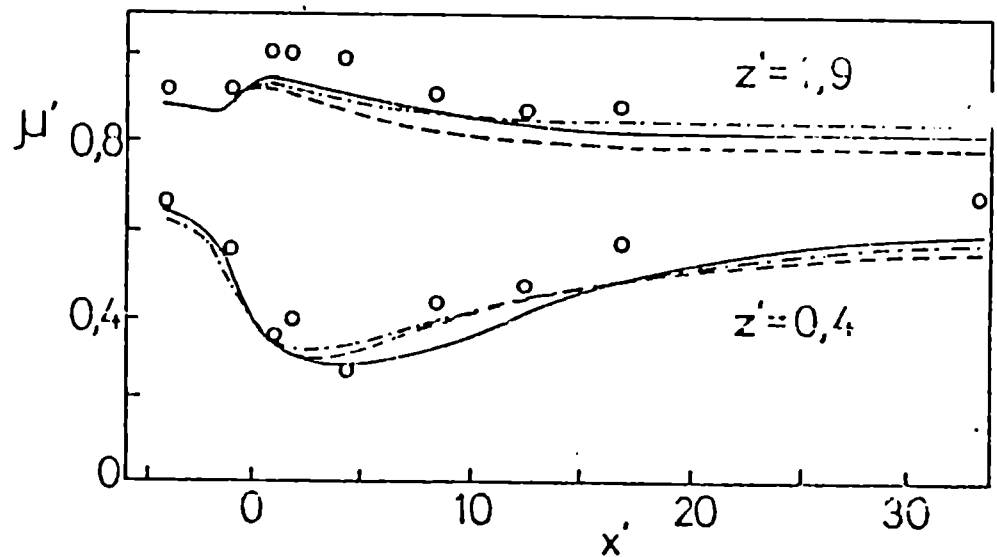


Fig. 17: Comparación entre las velocidades calculadas por el modelo desarrollado por Wilson (1985) con tres esquemas de clausura (a ---, b - · -, c —) y las observadas (\circ) para $z'=0.4$ y 1.9 .

5. DESARROLLO DE UN MODELO SEMIEMPIRICO QUE DESCRIBE EL FLUJO MEDIO DEL AIRE OBSTACULIZADO POR UNA CORTINA ROMPEVIENTOS

5.1 La Capa límite atmosférica

La capa límite atmosférica se origina por la influencia que ejerce la superficie terrestre sobre el movimiento del aire. Esta influencia está determinada, principalmente, por la fricción del suelo que actúa sobre las capas bajas de la atmósfera.

La capa límite atmosférica puede dividirse en tres regiones (Figura 18). El movimiento del aire en la capa más baja está determinado por la acción de las fuerzas viscosas. Esta capa se denomina capa laminar o viscosa y su espesor es de unos pocos milímetros. Por encima de ella se desarrolla la capa límite de superficie cuya altura varía entre los 20 y 100 metros. En ella predomina la fuerza de fricción, que origina movimientos turbulentos. La región superior denominada capa límite externa se caracteriza por el balance entre las fuerzas de presión, Coriolis y viscosas que actúan sobre la turbulencia del aire.

Debido a la importancia de la estructura de la capa límite de superficie en la caracterización del flujo del aire obstaculizado por una cortina rompevientos, en el Anexo II se incluye una breve descripción de la misma.

5.2 Hipótesis de la semejanza euleriana aplicada al flujo del aire en una capa límite de superficie, con interposición de una cortina rompevientos.

Si al flujo del aire se le interpone una cortina rompevientos, el perfil vertical de la velocidad media del viento a sotavento de la

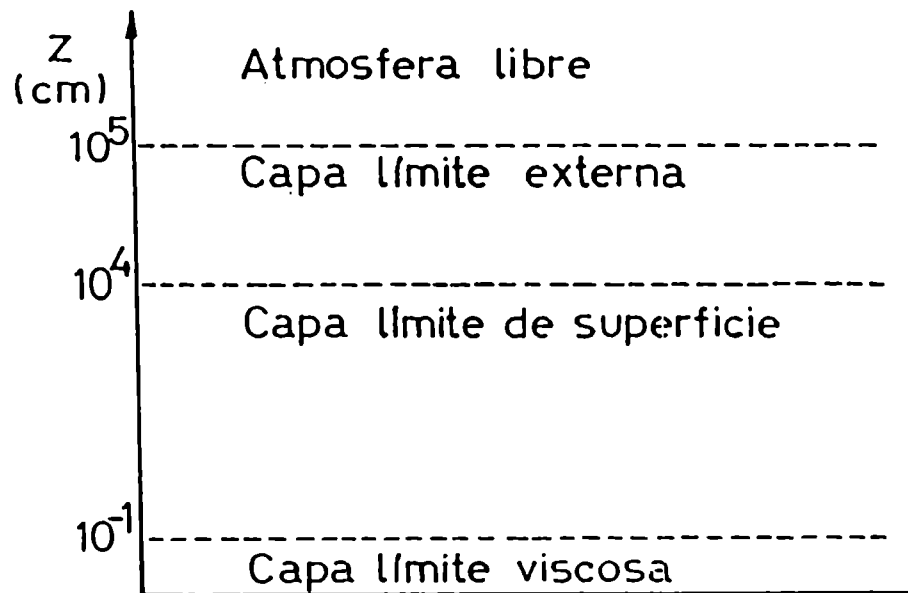


Fig. 18: Esquema de la capa límite de la atmósfera, desarrollado para superficies aerodinámicamente suaves.

misma no puede ser representado mediante la expresión (2.5) del Anexo II, obtenida aplicando la hipótesis de la semejanza euleriana de Monin-Obukhov al aire que fluye sobre un suelo aerodinámicamente liso.

Una posible metodología para estudiar la caracterización del flujo del aire con la presencia de un obstáculo, es modificar los argumentos incluidos en la expresión del Anexo II (2.1) con el objeto de posibilitar la representación paramétrica de los diferentes procesos involucrados.

Tomando como base la metodología propuesta por Woodruff (1963) se postula que la diferencia (Δu) entre la velocidad del viento antes y después de la cortina depende de la altura (z), la velocidad de fricción (u_*) y la longitud de estabilidad atmosférica (L_0) incluí-

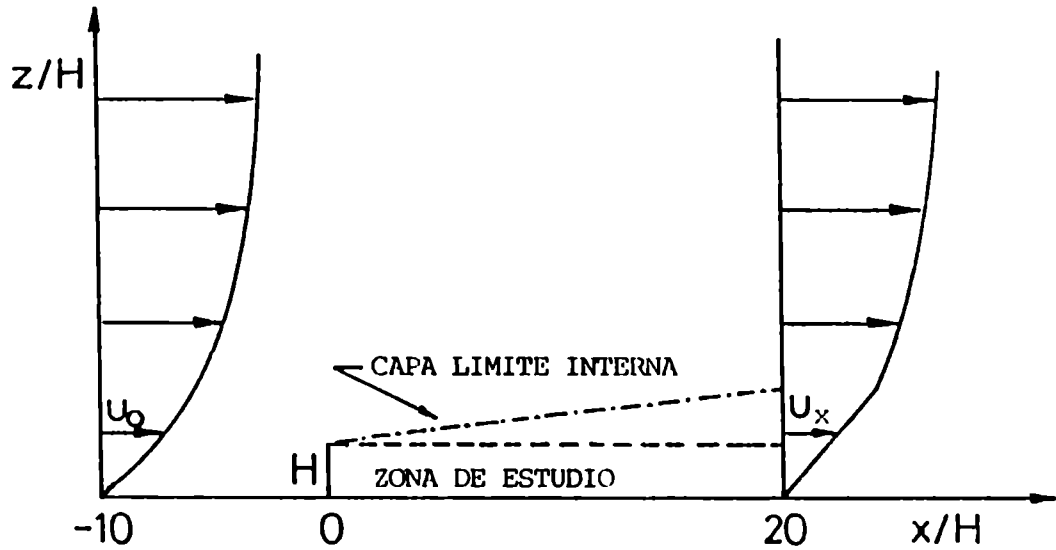


Fig 19: Representación esquemática de la region de estudio.

das en (2.1) y, además, de la distancia (x) a sotavento de la cortina en la dirección de viento y de su altura (H) y su porosidad (P) (ver van Eimern y otros, 1964; Plate, 1971). De esta manera, se incluyen parámetros argumentales representativos de la cortina (H , P), de la geometría del recinto (x , z) y de las características del fluido (turbulencia mecánica: u_x y estabilidad atmosférica: L_0)

Luego:

$$\Delta u = R(z, u_x, L_0, H, P) \quad (48)$$

donde $\Delta u = u_x(z) - u_0(z)$ siendo $u_0(z)$ la velocidad media del viento a barlovento de la cortina a una distancia tal, que el flujo del aire no esté afectado por la misma (generalmente una distancia mayor que $10H$), $u_x(z)$ la velocidad a la misma altura a sotavento (ver Figura 19) y R es una función de los argumentos incluidos en (48).

5.3 Análisis dimensional

La idea de reproducir un fenómeno en una escala y de esta manera inferir, utilizando los datos obtenidos, el comportamiento en otra escala, se ha utilizado en diferentes simulaciones. Sin embargo, las bases científicas de ese método son relativamente recientes. La teoría matemática en la que se basa el "Análisis dimensional" es puramente algebraica.

La base teórica de la experimentación con modelos se encuentran en la semejanza mecánica. El análisis dimensional utiliza magnitudes homogéneas. Es decir, los términos de una ecuación deben tener grado constante respecto de las unidades previamente elegidas. Esto permite el conocimiento de la ley estadística que, por lo menos, posibilite una idea de su forma general, lo que es útil aunque sea como guía experimental.

Para aplicar el análisis dimensional es necesario conocer previamente las variables que intervienen en el fenómeno físico. Estas variables pueden ser representadas por magnitudes derivadas que a su vez dependan del sistema fundamental seleccionado.

La aplicación del análisis dimensional a problemas prácticos se basa en la hipótesis de que la solución de un problema se obtiene mediante una ecuación dimensionalmente homogénea en términos de los "argumentos" del problema.

En 1914, Buckingham sentó el principio fundamental del análisis dimensional con el teorema π que lleva su nombre. Este teorema constituye la médula del análisis dimensional y permite reducir el número de variables que deben tenerse en cuenta en el problema que se estudia. De esta manera se facilita la formación de relaciones empíricas.

En el Anexo III se presenta un breve desarrollo del Teorema π de

Buckingham.

Existen diferentes aplicaciones del análisis dimensional ordinario (ver Rey Pastor y otros, 1965; Zierp, 1971) a procesos físicos en general (ver Prandtl, 1952; Birkhoff, 1955; Landau y Lifshitz, 1959, Hughes y Brighton, 1970) y a procesos atmosféricos particulares (ver Monin, 1972; Win Nielsen, 1977; Sutton, 1977; Oke, 1982; Panofsky y Dutton, 1984).

A continuación se aplicará el Teorema Pi de Buckingham para obtener una relación entre las variables incluidas en la expresión (48).

Las dimensiones de las variables involucradas en la expresión (48) son las siguientes:

Variable	Dimensiones
Δu	LT^{-1}
u_*	LT^{-1}
z	L
L_0	L
x	L
H	L

donde L representa la longitud y T el tiempo.

De esta manera, se puede formar la siguiente matriz dimen.

	Δu	u_*	z	L_0	x	H
T	-1	-1	0	0	0	0
L	1	1	1	1	1	1

donde las columnas identifican las variables y las filas las

dimensiones, colocándose los exponentes correspondientes para cada elemento (fila-columna). Utilizando el rango (r) de la matriz, cuyo determinante no sea nulo, se obtiene que el número de grupos adimensionales será (n-r), donde n es la cantidad de columna o variables dimensionales. Por lo tanto, se desprende que, en el caso que se considera, se obtendrán cuatro números adimensionales, pudiéndose agregar la porosidad (P) como un quinto número.

De esta manera resulta la siguiente ecuación adimensional:

$$\begin{matrix} k_1 & -k_1 & k_2 & -k_2 & k_3 & k_4 & k_5 & k_6 \\ L & T & L & T & L & L & L & L \end{matrix} = 1 \quad (49)$$

Como para cada dimensión la suma de los exponentes k debe ser nula, resulta:

$$k_1 + k_2 = 0$$

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 = 0 \quad (50)$$

Una forma de resolver este sistema de ecuaciones es obtener cada solución fundamental igual a la unidad y anular las restantes. De esta forma se encuentran los siguientes números adimensionales:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \Delta u / u \\ \pi_2 &= x / H \\ \pi_3 &= H / L \\ \pi_4 &= z / H \\ \pi_5 &= P \end{aligned} \quad (51)$$

Por el Teorema Pi de Buckingham (ver Anexo III), π_1 se puede expresar de la siguiente forma:

$$\pi_1 = R(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (52)$$

Luego, reemplazando por las variables correspondientes, resulta:

$$\Delta u = u_* R_1(x/H, z/H, H/L_0, P)/k \quad (53)$$

La forma funcional de R_1 deberá ser encontrada utilizando datos observacionales.

En la expresión (53) se incluye la constante de von Kármán (k) para que se verifique semejanza con el perfil del viento que se genera cuando el aire fluye sobre una superficie aerodinámicamente lisa.

De la ecuación (53) se desprende que la modificación del flujo del aire, producida por una cortina rompevientos, depende de la velocidad de fricción (u_*), la altura adimensional ($z' = z/H$) y la distancia adimensional ($x' = x/H$) a sotavento, de un parámetro de estabilidad de la atmósfera (H/L_0) y de la porosidad de la cortina (P).

En la ecuación (53) la influencia de la estabilidad atmosférica sobre la eficiencia de la cortina está representada por el término H/L_0 . Por lo tanto, si se consideran condiciones de neutralidad ($H/L_0 = 0$) la relación (53) se reducirá a:

$$\Delta u = u_* R_2(x/H, z/H, P)/k \quad (54)$$

Por otra parte, cuando se supone que la estabilidad y la porosidad son constantes, la función R_2 dependerá, solamente, de la altura y la distancia relativas, y la expresión (54) resulta:

$$\Delta u = u_* R_3(x', z')/k \quad (55)$$

donde $x' = x/H$ y $z' = z/H$

Si no existiera la cortina rompevientos la expresión (55) deberá coincidir con la (18).

Para conocer la relación existente entre la variación de la velocidad del viento y los argumentos, es necesario encontrar las formas funcionales de los diferentes R en base a datos experimentales.

5.4 Relación entre el coeficiente de arrastre aerodinámico y la porosidad de la cortina.

Como se mencionó anteriormente (ver Capítulo 4), la evaluación de la eficiencia de una cortina rompevientos puede realizarse mediante el análisis del coeficiente de arrastre (C_D). A continuación, se establecerá una dependencia entre C_D y la porosidad (P). Esto significa que, indirectamente, en los argumentos de la ecuación (54) se encuentra C_D al considerarse P .

De acuerdo con Seginer y Sagi (1972) el coeficiente de arrastre originado por una cortina rompevientos puede ser obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$C_D = 2k \Lambda / (\ln(z'/z'_0))^2 \quad (56)$$

donde:

$$\Lambda = \int_{x'_1}^{x'_2} (1 - u'^2) dx' \quad (57)$$

con $u' = u_x/u_0$, u_0 la velocidad media del viento a sotavento de la cortina, u_x la velocidad media a barlovento a una distancia tal que el

flujo no este perturbado por la cortina (generalmente una distancia mayor que $10l_0$) y z_0 la longitud de rugosidad.

Hagen y otros (1981), encontraron que el coeficiente de arrastre disminuye al aumentar la porosidad de la cortina.

De la ecuación (56), se obtiene que el efecto de los rompevientos sobre el coeficiente de arrastre está representado por A . Por lo tanto, con el fin de encontrar una relación entre C_D y la porosidad de la cortina se determinó la dependencia de A con la porosidad.

La evaluación de la integral de la expresión (57) se realizó gráficamente. Se representó u' en función de x' y se integró gráficamente centrando en el espacio con intervalos $x' = 0.5$ (ver Figura 20).

Los datos utilizados para evaluar A mediante la ecuación (57) fueron los obtenidos para $z' = 1$ y 0.5 por Raine (1974) (Tabla I) con cortinas rompevientos del 20, 34 y 50% de porosidad. Para el nivel inferior, $z' = 0.25$, se utilizaron los valores obtenidos por Hagen y otros (1981) (Tabla II) para porosidades del 20, 40 y 60 %.

En la Figura 21 se encuentran graficados los valores (Tabla III) de A en función de la porosidad. La Figura 21a corresponde a $z' = 0.25$, la Figura 21b a $z' = 0.5$ y la Figura 21c a $z' = 1.0$. En las mismas se observa que el parámetro A tiene una variación casi lineal con las porosidad, excepto para $z' = 0.25$. Mediante el ajuste de los valores obtenidos se encontraron las siguientes relaciones de A en función de la porosidad (P), para diferentes z' :

$$\text{Para } z' = 1 \text{ y } 0.25 \quad A = -mP + o \quad (58)$$

$$\text{Para } z' = 0.5 \quad A = -m \ln(P) + o \quad (59)$$

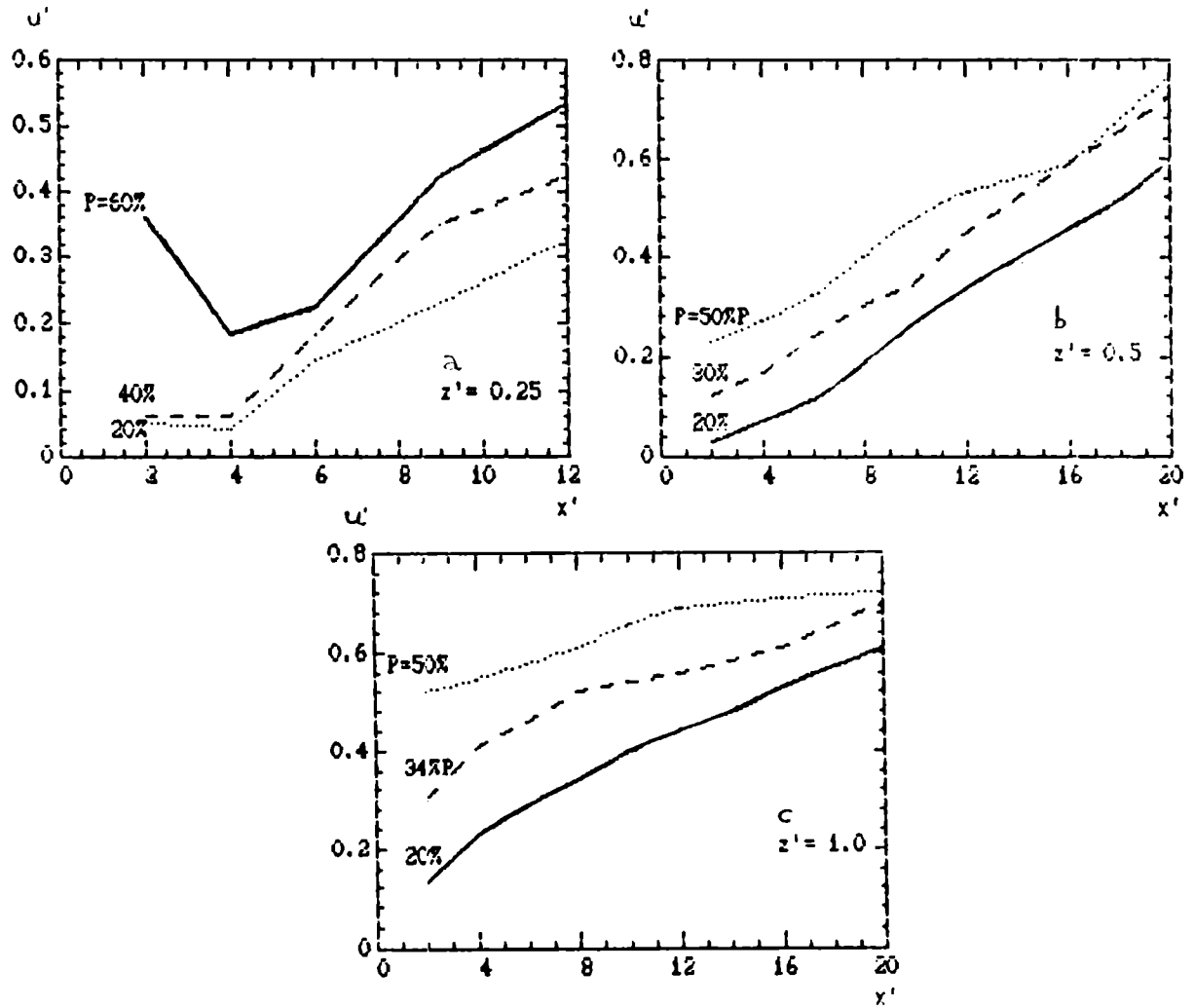


Fig. 20: Variación de u' con la distancia para diferentes porosidades (P) y alturas (z').

los valores de m y o se encuentran en la Tabla IV.

Reemplazando las ecuaciones (58) y (59) en la expresión (56) se encuentran las siguientes formas funcionales de C_D :

Para $z' = 1.0$ y 0.25

$$C_D = 0.32(o - mP)/(\ln(z'/z'_o))^2 \quad (60)$$

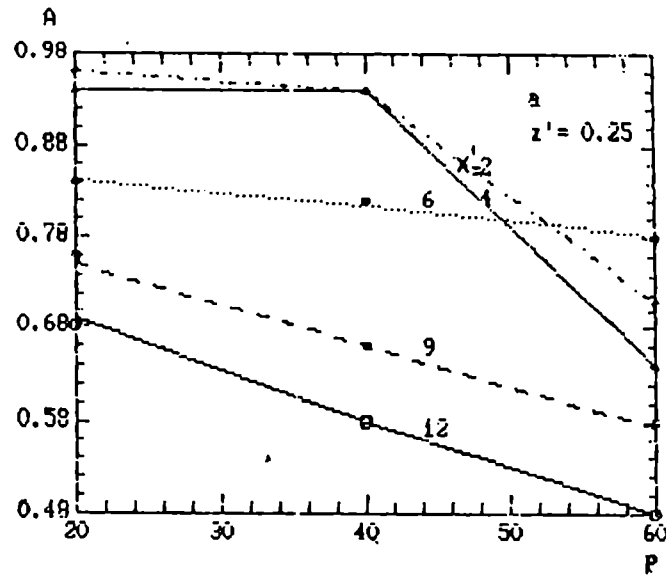


Fig. 21a: A en función de la porosidad correspondiente a $z' = 0.25$ para diferentes distancias x' .

Para $z' = 0.5$

$$C_D = 0.32(0 - \ln(P)) / (\ln(z'/z'_0))^2 \quad (61)$$

De las ecuaciones (60) y (61), se desprende que el coeficiente de arrastre depende de P , x' , z' y z'_0 , que son algunos de los parámetros incluidos en la expresión (48). Por lo tanto en la expresión (53), obtenida mediante el análisis dimensional ordinario, indirectamente está incluido el coeficiente de arrastre aerodinámico.

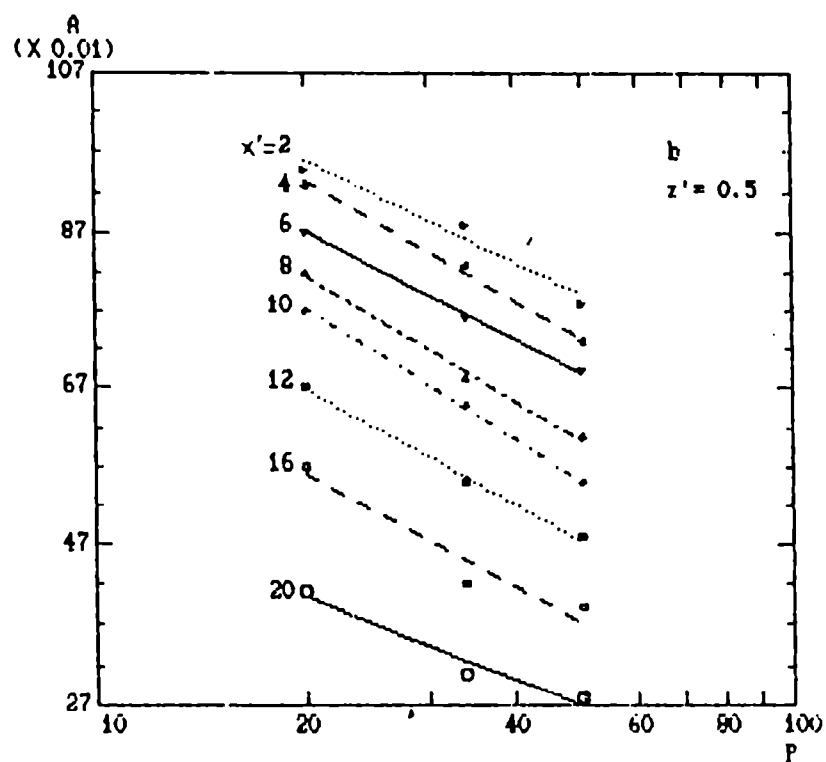


Fig. 21b: A en función de la porosidad (P) correspondiente a $z' = 0.5$ para diferentes x' .

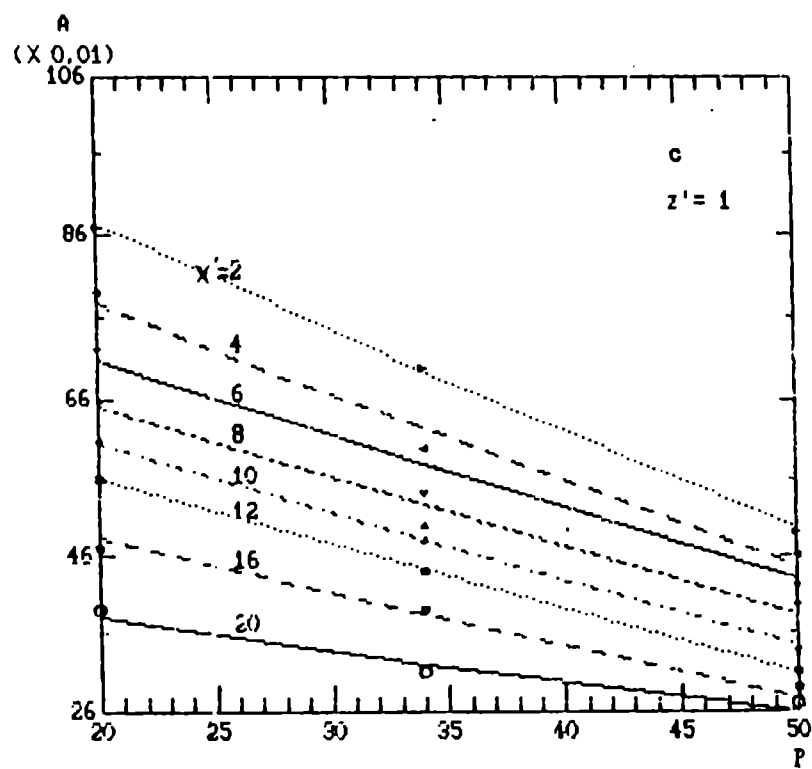


Fig. 21c: A en función de la porosidad (P) correspondiente a $z' = 1.0$.

5.5 Formas funcionales de R_z

En la Tabla V se encuentran las diferentes experiencias de campo que fueron utilizadas para la obtención de las expresiones de R_z .

Los datos (Tabla VI) utilizados para obtener la forma funcional de R_z fueron obtenidos por Maki (1982) en una experiencia de campo realizada sobre un suelo sembrado con arroz, en condiciones atmosféricas neutrales. Durante la experiencia se utilizó una cortina rompevientos artificial de 2 metros de altura y 185 m de longitud con una porosidad del 50%. Las mediciones de la velocidad del viento se realizaron con anemómetros de copelas ubicados en una línea perpendicular a la cortina a las distancias $x = -20, -15, -10, -5, -2.5, 1, 2, 3.75, 5, 7.5, 10, 15$ y 200 (donde el signo negativo indica la distancia a barlovento y la no especificación de signo designa la componente a sotavento de la cortina) a las alturas de 0.5, 1 y 2 metros sobre el suelo.

Con el fin de independizar la expresión (55) de la velocidad de fricción se utiliza la relación (13). Luego, reemplazando (13) en (55), resulta:

$$R_z(x', z') = \Delta U \ln(z'/z'_0) \quad (62)$$

donde: $\Delta U = 1 - u'$, $u' = u_x/u_0$ y $z'_0 = z_0/H$.

La ecuación (62) requiere como dato de entrada la longitud de rugosidad del terreno, mientras que la (55) necesita la velocidad de fricción u_x . Es decir, la aplicación de la expresión (62) tiene la ventaja de utilizar z_0 que es un parámetro evaluable con menor cantidad de información que u_x o inspección directa del tipo de terreno (ver WMO, 1981).

Los valores de R_z obtenidos a partir de la expresión (62) se

incluyen en la Tabla VII. En la Figura 22 se encuentran graficados los valores de R_3 para $z' = 0.25$ (Figura 22a), 0.5 (Figura 22b), 0.75 (Figura 22c) y 1.0 (Figura 22d). Utilizando los valores de R_3 encontrados se obtienen las formas de R_3 en función de x' para diferentes z' . Las funciones de R_3 encontradas para diferentes rangos de x' tienen la siguiente forma cuadrática:

$$R_3 = a_3 - b_3 x' + c_3 x'^2 \quad (63)$$

Los valores de a_3 , b_3 y c_3 se encuentran en la Tabla VIII.

Con el objeto de completar la evaluación se graficaron (ver Figura 23) los valores de a_3 , b_3 y c_3 , incluidos en la expresión (63), en función de la altura normalizada (z') para los diferentes rangos de x' , encontrándose las siguientes relaciones:

$$a_3 = d_3 - e_3 z'^{-2} \quad (64)$$

$$b_3 = f_3 + g_3 z' \quad (65)$$

$$y \quad c_3 = -h_3 + i_3 z' \quad (66)$$

Los valores de d_3 , e_3 , f_3 , g_3 , h_3 e i_3 se incluyen en la Tabla IX.

Reemplazando (64) a (66) en (63) y combinando con la (62) se obtiene:

$$u' = 1 - (d_3 - e_3 z'^{-2} - (f_3 + g_3 z')x' + (-h_3 + i_3 z')x'^2) / \ln(z'/z'_0) \quad (67)$$

Luego, mediante la ecuación (67) se puede estimar el efecto relativo de una cortina rompevientos, en condiciones atmosféricas neutrales y flujo perpendicular, conociendo solamente parámetros relacionados con la cortina y el terreno.

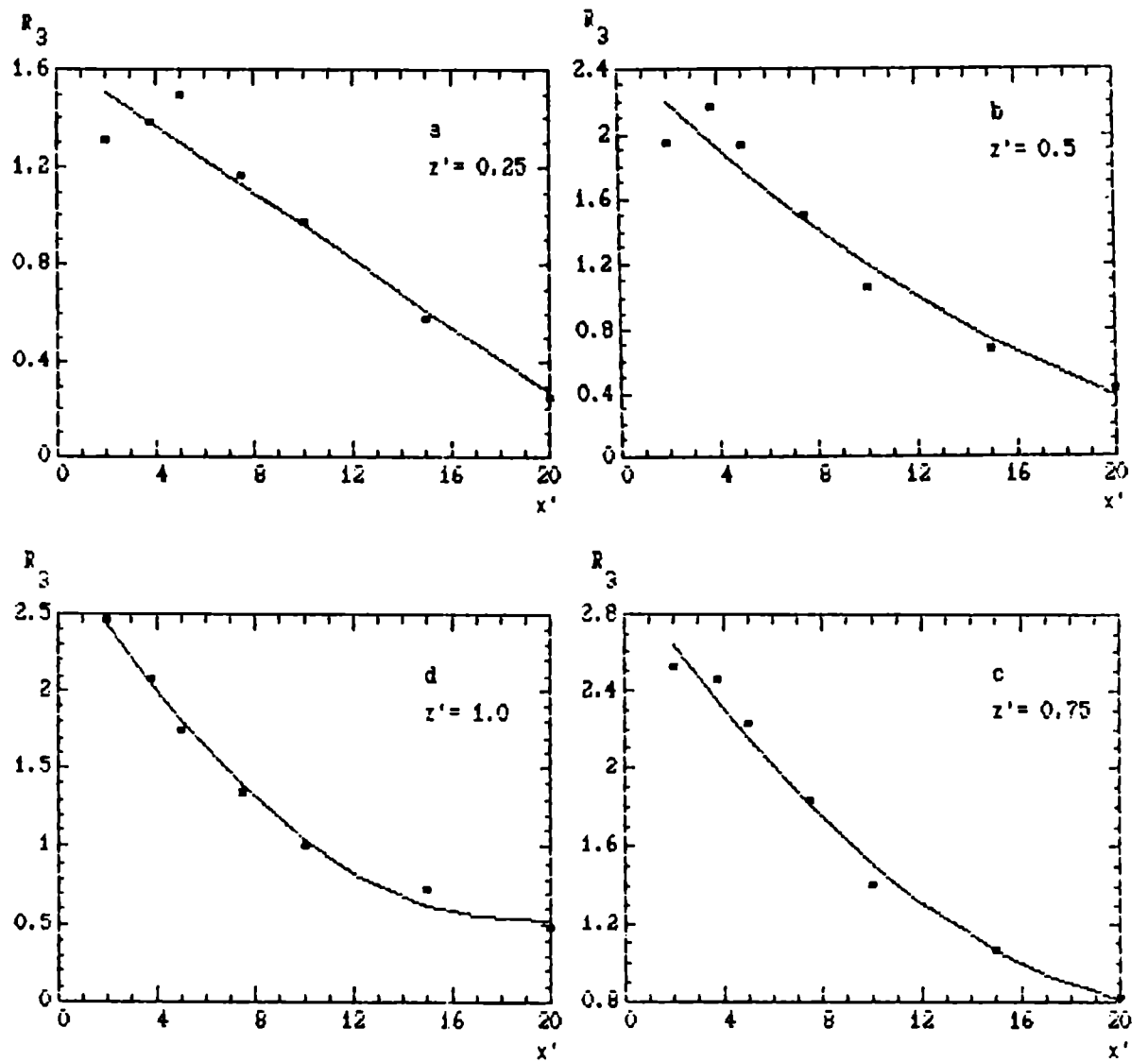


Fig. 22: Variación de R_3 con la distancia x' para diferentes z' .

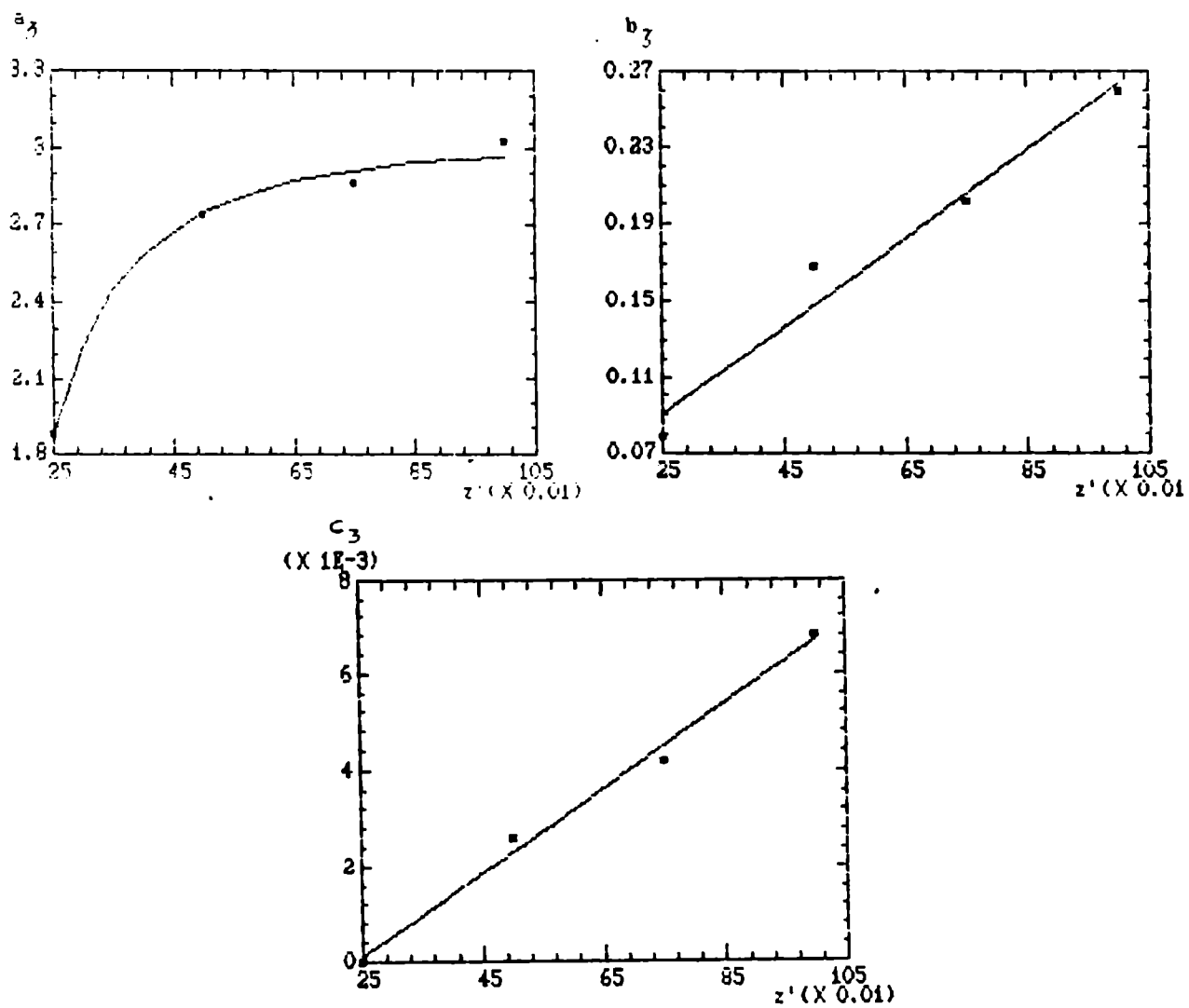


Fig. 23: Valores de a_3 , b_3 y c_3 correspondientes a las expresiones (64) a (66) en función de la altura z' para $P = 50\%$.

5.6 Inclusión de la porosidad como parámetro representativo de la cortina

La expresión (67) fue desarrollada en base a datos experimentales obtenidos con cortinas rompevientos del 50% de porosidad (Maki, 1982). Para extender la validez del modelo, es necesario utilizar datos experimentales obtenidos con cortinas rompevientos de diferentes porosidades. Reemplazando en la expresión (54) la velocidad de fricción (u_*) obtenida utilizando la ecuación (13), es posible encontrar las formas funcionales de R_2 utilizando la siguiente relación:

$$R_2(x', z', P) = \Delta U \ln(z' / z'_0) \quad (68)$$

donde:

$\Delta U = 1 - u'$, $u' = u_x / u_0$, $z'_0 = z_0 / l$ y z_0 es la longitud de rugosidad.

La forma funcional de $R_2(x', z', P)$ puede ser encontrada utilizando datos experimentales. Los datos empleados fueron obtenidos por Raine (1974) en experiencias en túneles de viento (Tabla I) con tres cortinas rompevientos de diferentes porosidades (20, 34 y 50%) para $z' = 0.5$ y $1..$ En estas experiencias las mediciones de la velocidad del viento se realizaron a $x = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16$ y $20H$ a sotavento de la cortina.

Para el nivel inferior, $z' = 0.25$, se utilizaron los valores obtenidos en experiencias de campo por Hagen y otros (1961) (Tabla II) con $P = 20, 40$ y 60% . La experiencia se llevó a cabo en un campo sembrado con gramíneas en el cual se emplazaron dos cortinas rompevientos. Una de ellas de 1.22 m de altura y 50 m de longitud (utilizada para obtener R) y la otra de 2.44 m de altura y 80 m de

longitud. Las mediciones de la velocidad del viento se realizaron con anemómetros de copelas ubicados a 2, 4, 6, 9 y 12m de distancia a sotavento de las cortinas.

Los valores de R_2 fueron obtenidos para las alturas $z' = 1.0, 0.5$ (ver Tabla X) y $z' = 0.25$ (ver Tabla XI) para $2 \leq x' \leq 20$ y diferentes porosidades. En las Figuras 24 a 26 se graficaron los valores de R_2 en función de P para diferentes z' y x' . De esas Figuras, se desprende que R_2 puede ser expresada en función de la porosidad (P) para distintas distancias (x') y alturas (z').

Cuando $z' = 1.0$ y $20\% \leq P \leq 50\%$, se encuentra la siguiente relación:

$$R_2 = O_2 - M_2 \ln(P) \quad (69)$$

Cuando $z' = 0.5$ y $20\% \leq P \leq 50\%$ se obtiene

$$R_2 = O_2 - M_2 P \quad (70)$$

donde O_2 y M_2 son parámetros (ver Tabla XII) que dependen de la distancia (x') y de la altura (z') relativa.

Cuando $z' = 0.25$ y $20\% \leq P \leq 40\%$ R_2 tendrá la siguiente forma funcional:

$$R_2 = O_2 - M_2 P \quad (71)$$

cuando $z' = 0.25$ y $40\% \leq P \leq 50\%$ R_2 resulta:

$$R_2 = O_2 - M_2 P \quad (72)$$

Los valores de las ordenadas (O_2 y O_2) y las pendientes (M_2 y M_2) se encuentran en la Tabla XIII.

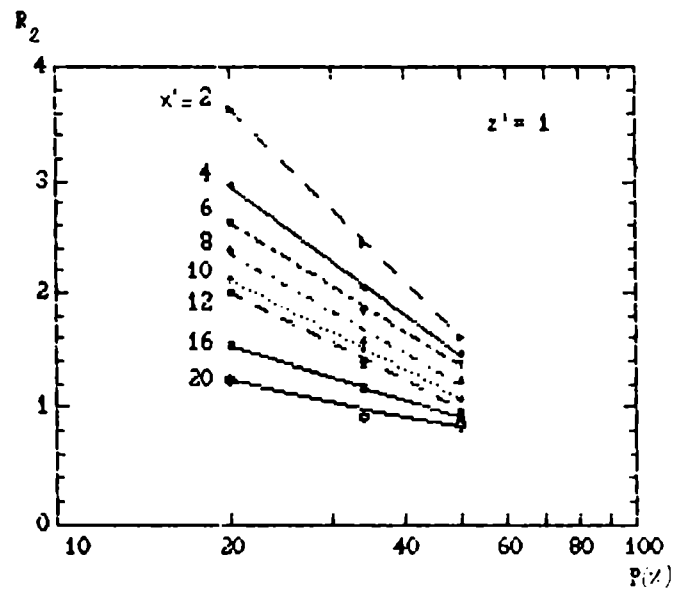


Fig. 24: Variación de R_2 con la porosidad (P) para diferentes x' correspondientes a $z' = 1.0$

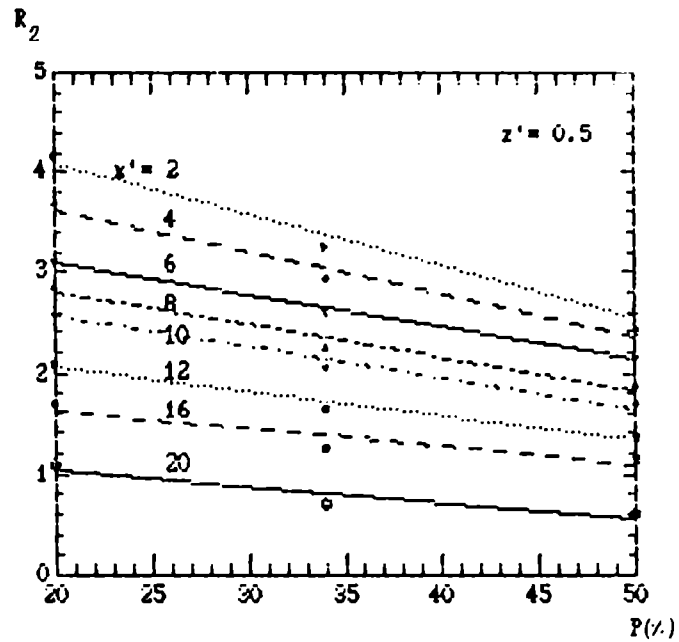


Fig. 25 Variación de R_2 con la porosidad (P) para diferentes x' correspondientes a $z' = 0.5$

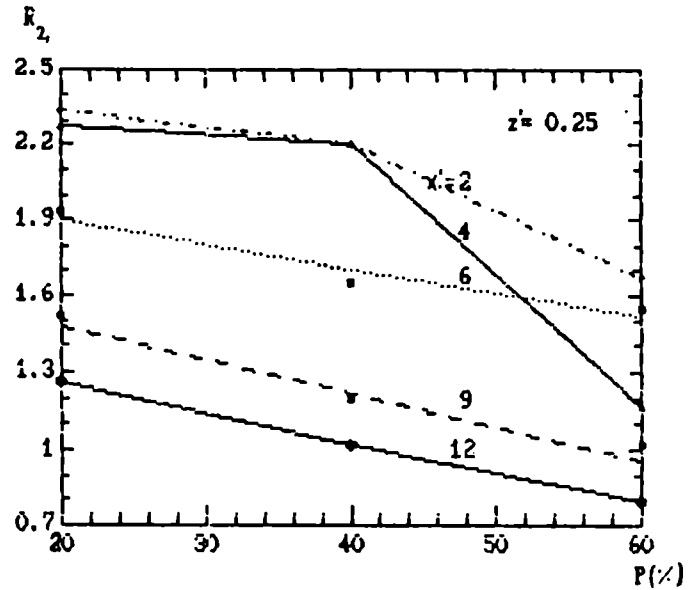


Fig. 26: Variación de R_2 con la porosidad (P) para diferentes x' correspondientes a $z' = 0.25$

Asimismo, para cada una de las alturas relativas se obtuvieron las relaciones entre las pendientes y las ordenadas en función de la distancia (x') a la cortina rompevientos. En la Figura 27 se representan los valores de M_2 y O_2 en función de la distancia relativa (x') correspondientes a $z' = 1.0$. La Figura 28 representa M_2 y O_2 en función de la distancia relativa (x') para $z' = 0.5$. La Figura 29 representa los valores de M en función de x' para rangos de $20\% \leq P \leq 40\%$ y $40\% \leq P \leq 50\%$, para $z' = 0.25$. Asimismo, la Figura 30 representa las ordenadas O en función de la distancia (x') para los rangos de porosidades $20\% \leq P \leq 40\%$ y $40\% \leq P \leq 50\%$, respectivamente y para $z' = 0.25$.

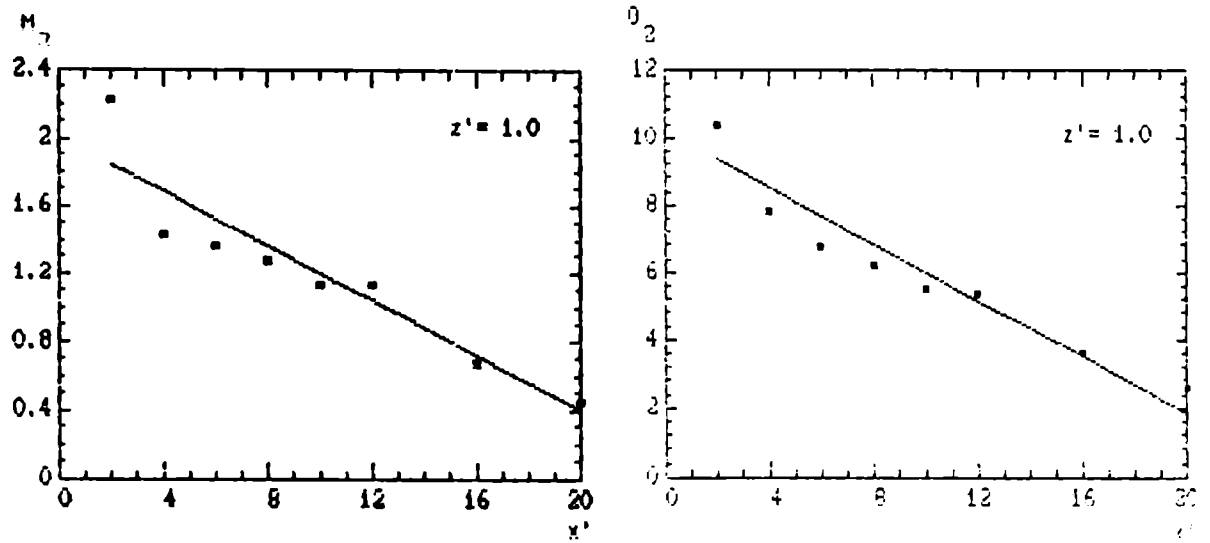


Fig. 27: Valores de la pendiente (M_2) y la ordenada (O_2) de la expresión (69) en función de x' correspondiente a $z' = 1.0$.

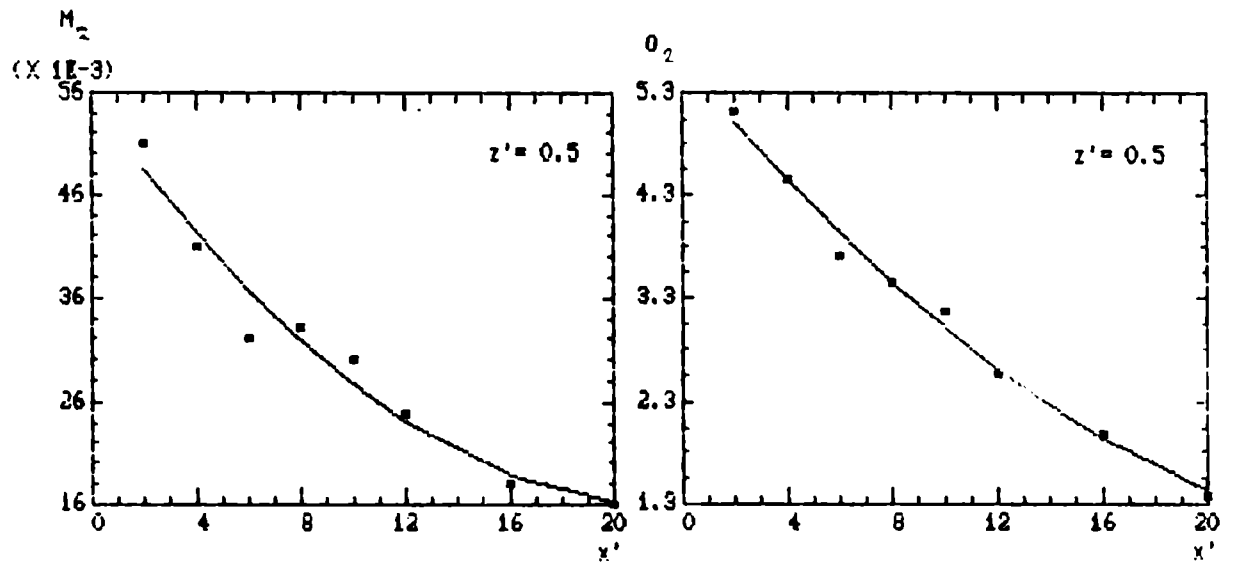


Fig. 28: Valores de la pendiente (M_2) y la ordenada (O_2) de la expresión (70) en función de x' correspondiente a $z' = 0.5$.

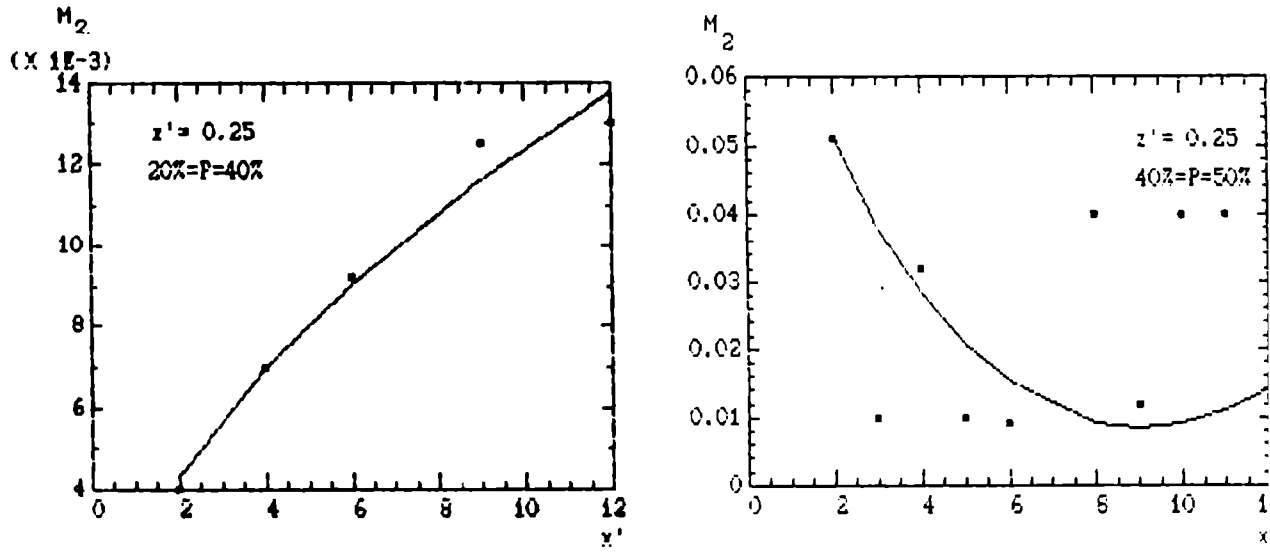


Fig. 29: Valores de la pendiente (M_2) de las expresiones (71) y (72) en función de x' para $20\% \leq P \leq 40\%$ y $40\% \leq P \leq 50\%$, correspondientes a $z' = 0.25$

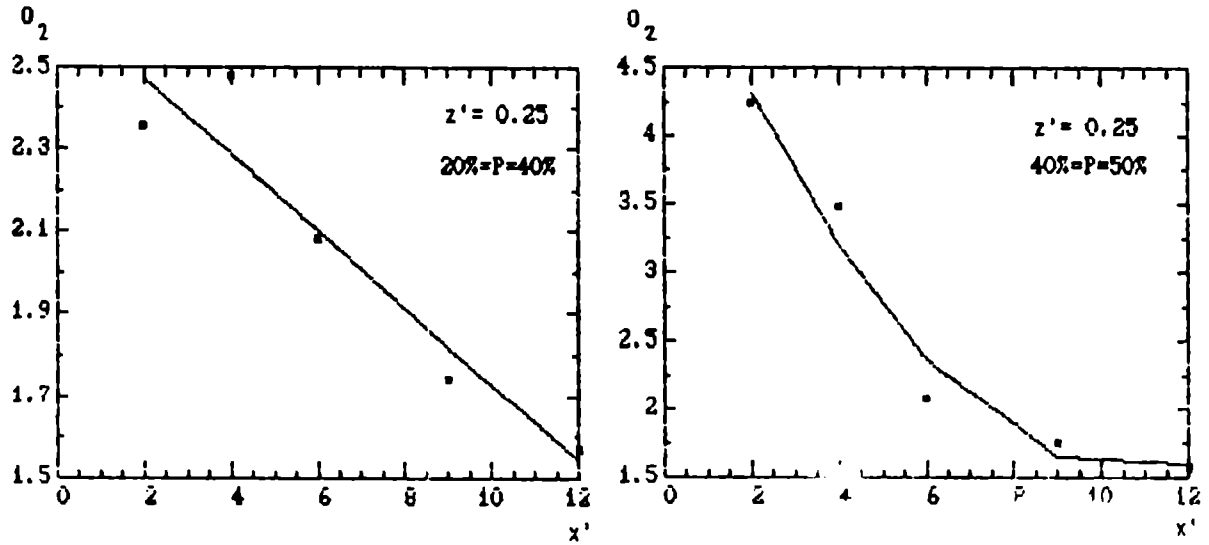


Fig. 30: Valores de la ordenada (O_2) correspondientes a las expresiones (71) a (72) en función de x' para $20\% \leq P \leq 40\%$ y $40\% \leq P \leq 50\%$, correspondientes a $z' = 0.25$.

Utilizando los valores incluidos en la Tabla XII se encuentran expresiones de M_2 y O_2 correspondientes a las alturas relativas $z' = 1$ y 0.5:

Cuando $z' = 1$ y $2 < x' \leq 20$

$$M_2 = a_2 - b x'_2 \quad (73)$$

$$O_2 = a'_2 - b'_2 x' \quad (74)$$

Cuando $z' = 0.5$ y $2 < x' \leq 20$

$$M_2 = c_2 - d_2 x' + e_2 x'^2 \quad (75)$$

$$O_2 = c'_2 - d'_2 x' + e'_2 x'^2 \quad (76)$$

donde a_2 , b_2 , c_2 , c'_2 , d'_2 y e'_2 (ver Tabla XIV) son parámetros que dependen de la distancia (x').

Las formas funcionales de M_2 , O_2 , M'_2 y O'_2 son las siguientes: cuando $z' = 0.25$ y $20\% \leq P \leq 40\%$ la pendiente (M_2) y la ordenada (O_2) resultan:

$$M_2 = f_2 - g_2 x'^{-1/2} \quad (77)$$

$$O_2 = -f'_2 + g'_2 x' \quad (78)$$

si $z' = 0.25$ y $40\% \leq P \leq 50\%$ M'_2 y O'_2 resultan:

$$M_2 = h_2 - i_2 x'^{1/2} + j_2 x'^2 \quad (79)$$

$$O_2 = h'_2 - i'_2 x' + j'_2 x'^2 \quad (80)$$

donde los valores de f_2 , g_2 , f'_2 , g'_2 , h_2 , i_2 , j_2 , h'_2 , i'_2 y j'_2 se incluyen en la Tabla XV. Estos valores fueron obtenidos a partir de datos observacionales que corresponden a $2 \leq x' \leq 12$. Suponiendo que el nivel inferior tiene el mismo comportamiento que en $z' = 1.0$ y 0.5 , se extrapolaron las expresiones obtenidas hasta $x' = 20$.

Reemplazando las expresiones (73) a (80) en las relaciones (69) a (72) y combinándolas con la ecuación (68), se obtiene que la velocidad relativa del viento (u') a sotavento de una cortina rompevientos, puede ser representada por las siguientes ecuaciones dependientes de la porosidad de la cortina, la altura y la distancia relativas:

cuando $z' = 1.0$, $20\% \leq P \leq 50\%$ y $2 \leq x' \leq 20$

$$u' = 1 - (a'_2 - b'_2 x' - (a_2 - b_2 x') \ln(P)) / \ln(z' / z'_0) \quad (81)$$

cuando $z' = 0.5$, $20\% \leq P \leq 50\%$ y $2 \leq x' \leq 20$

$$u' = 1 - (c'_2 - d'_2 x' + e'_2 x'^2 - (c_2 - d_2 x' + e_2 x'^2) P) / \ln(z' / z'_0) \quad (82)$$

cuando $z' = 0.25$, $2 \leq x' \leq 20$ y $20\% \leq P \leq 40\%$

$$u' = 1 - (f'_2 - g'_2 x' - (f_2 + g_2 x'^{1/2}) P) / \ln(z' / z'_0) \quad (83)$$

cuando $z' = 0.25$, $2 \leq x' \leq 20$ y $40\% \leq P \leq 50\%$

$$u' = 1 - (h'_2 - i'_2 x' + j'_2 x'^2 - (h_2 - i_2 x'^{1/2} + j_2 x'^2) P) / \ln(z' / z'_0) \quad (84)$$

A partir de las ecuaciones (81) a (84) es posible determinar la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos cuando el flujo es perpendicular a la misma, en condiciones atmosféricas neutrales. Para ello, es necesario conocer las

características de la cortina rompevientos (porosidad y altura) y del parámetro de rugosidad del terreno. Las Figuras 31.a y 31.b muestran una simulación de la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos utilizando las ecuaciones propuestas. La simulación se realizó aplicando las ecuaciones (81) a (84), suponiendo $z'_0 = 0.01$ y porosidades de 50 y 20%. En la Figura 31.a se representa el efecto sobre la velocidad relativa del viento (u') de una cortina rompevientos de 50% de porosidad. Se observa que la máxima reducción del viento se produce a una distancia de aproximadamente $3H$ ó $4H$, a partir de la cual aumenta rápidamente hasta acercarse a su valor original (ver Figura 7). En la Figura 31.b se representa el efecto de una cortina rompevientos de 20% de porosidad. En este caso, la máxima reducción del viento no puede ser representada, ya que la misma se produce a una distancia de aproximadamente H (ver Figura 6) y el modelo sólo es válido a partir de $3H$. La Figura 31 muestra, en general, existe un buen comportamiento cualitativo de la velocidad relativa del viento obtenida a partir del modelo propuesto.

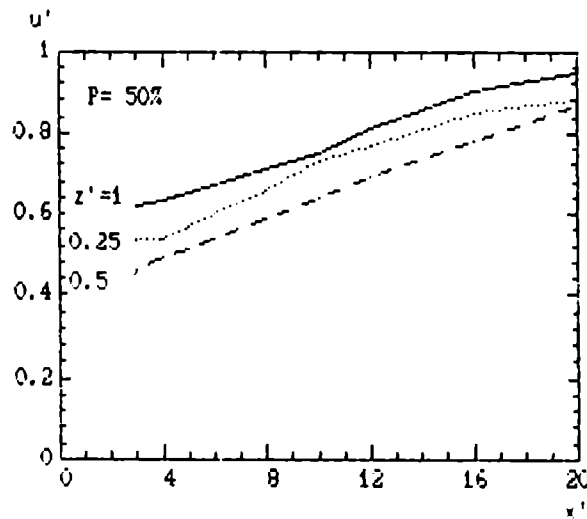


Fig. 31.a: Simulación de la velocidad relativa del viento (u') a partir de las ecuaciones (81) y (84) para $P = 50\%$.

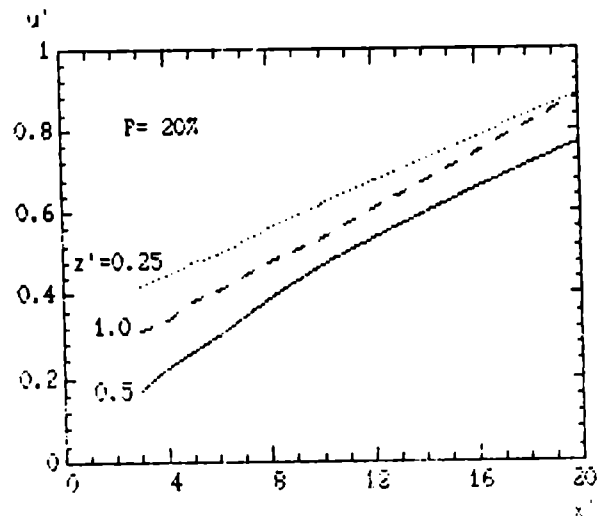


Fig. 31.b: Simulación de la velocidad relativa del viento (u') a partir de las expresiones (81) a (84) para $P = 20\%$.

5.7 Influencia de la estabilidad atmosférica sobre la eficiencia de las cortinas rompevientos.

La efectividad de una cortina rompevientos es función, también, de la estabilidad atmosférica. Esto se debe a que el intercambio turbulento de la cantidad de movimiento y, por lo tanto, la velocidad del viento dependen, en gran medida, de la estabilidad de la atmósfera. En condiciones inestables, la fuerza ascensional produce un marcado intercambio de cantidad de movimiento, lo que ocasiona que la velocidad del viento, cerca del suelo, a sotavento de una cortina rompevientos, alcance su valor original a una distancia menor que en condiciones atmosféricas estables. Por lo tanto, la zona de protección es menor en condiciones inestables. (Woodruff y otros,

1963; van Eimern y otros, 1964).

La falta de una suficiente cantidad de datos experimentales, obtenidos en condiciones de inestabilidad atmosférica, no permite parametrizar en el modelo propuesto su efecto sobre la velocidad del viento.

Seginer (1975) a partir de datos experimentales, obtenidos utilizando una cortina rompevientos de 2 metros de altura y una porosidad del 50% encontró una expresión empírica de la velocidad relativa ($u' = u_x/u_o$) del viento, válida para condiciones de inestabilidad atmosférica y una altura $z' = 0.25$:

$$u' = 1 - \xi e^{\alpha R_i} \quad (85)$$

donde R_i es el número de Richardson a la altura de la cortina (ver Panosky y Dutton, 1984), ξ y α son parámetros que dependen de la distancia a la cortina rompevientos. El parámetro α (Figura 32b.) expresa la proporción relativa de cómo el viento relativo (u') aumenta cuando la inestabilidad se incrementa. En la Figura 32a. se muestra que el efecto de la inestabilidad es mínimo cerca del rompevientos, donde la turbulencia producida por la cortina rompevientos es dominante.

El efecto absoluto de la estabilidad está representado por el producto $\xi\alpha$ (Figura 32c.), que se obtiene a partir de la ecuación (84) cuando $R_i = 0$. El producto $\xi\alpha$ en función de la distancia al rompevientos, muestra que el efecto máximo absoluto se produce cuando $z' = 10$.

Seginer (1975), concluyó que, para el caso estudiado, el efecto de la variación de la estabilidad sobre la velocidad relativa es significativo para aquellos casos de marcada inestabilidad atmosférica. Esto se debe, principalmente, a que la turbulencia mecánica producida por la cortina rompevientos, es la principal res-

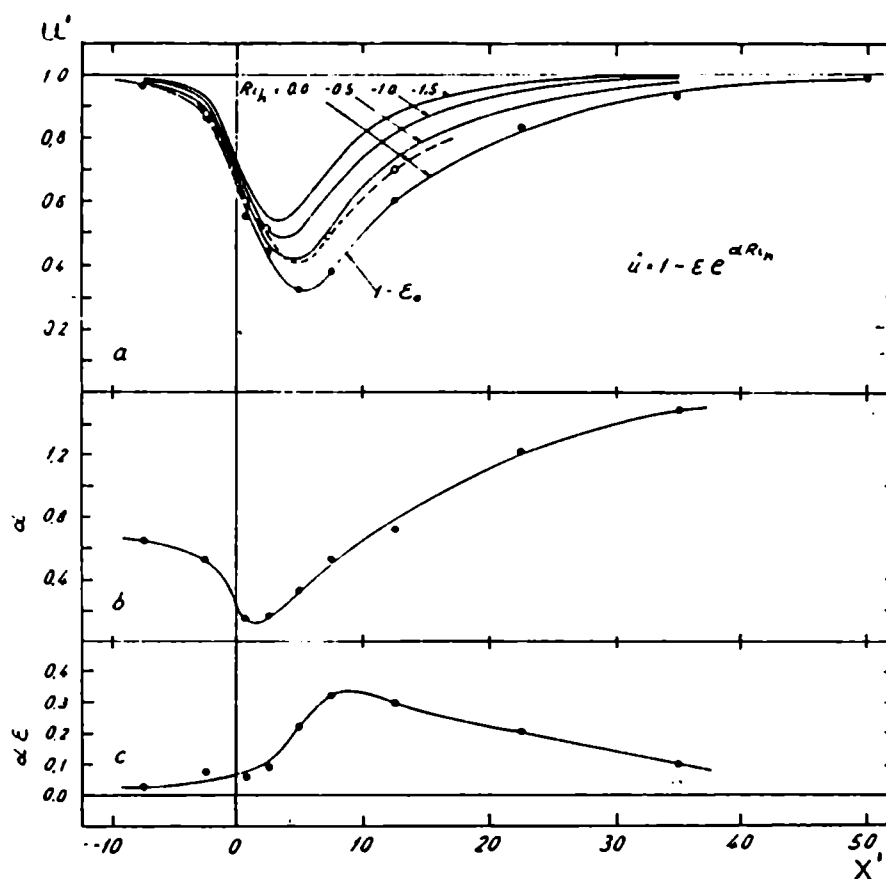


Fig. 32: a) Velocidad relativa u' en función de la distancia y la estabilidad atmosférica. b) coeficiente α en función de la distancia. c) Producto $\epsilon\alpha$ en función de la distancia (Seginer, 1974).

ponsable de la recomposición del viento a sotavento de una cortina rompevientos. Por ejemplo, para una distancia de 7.5" a sotavento de la cortina, en condiciones de neutralidad atmosférica ($R_i = 0$) se origina una reducción de 36% en la velocidad del viento, mientras se observa una reducción del 62% cuando $R_i = -1$ (Figura 32a.).

5.8 Análisis de la sensibilidad del modelo

Con el objeto de analizar la sensibilidad del modelo propuesto (ecuaciones (81) a (84)) a la variación de los diferentes parámetros involucrados, se realizaron las siguientes pruebas:

5.8.1 Sensibilidad respecto de la longitud de rugosidad (z_0):

Manteniendo constante la altura y porosidad de la cortina rompavientos se modificó la longitud de rugosidad. Una modificación en z_0 del 100% produce, en promedio, para los tres niveles ($z' = 1.0$, 0.5 y 0.25) una variación en la velocidad relativa del viento del 12% cerca de la cortina, disminuyendo su efecto a medida que aumenta x' (Figura 33).

5.8.2 Sensibilidad respecto de la altura de la cortina rompavientos

Manteniendo constantes la longitud de rugosidad y la porosidad de la cortina, se aplicó el modelo a cortinas rompavientos de diferentes alturas. Se verificó que la mayor influencia de la altura se produce para $z' = 0.5$ y 0.25 y disminuye al aumentar la distancia (x'). Una variación del 50% en h produce una diferencia en la velocidad relativa entre el 40% y el 10% (ver Figura 34).

5.8.3 Sensibilidad respecto de la porosidad de la cortina

Manteniendo constante la altura de la cortina y la longitud de rugosidad se modificó la porosidad en un 50%. La mayor variación en la velocidad relativa, (alrededor del 70%), se produce cuando $z' = 0.5$. Si $z' = 1$ y 0.25 la modificación resulta de alrededor del 50%. Para las tres alturas relativas ($z' = 0.25$, 0.5 y 1.0) la mayor influencia se verifica cerca de la cortina, disminuyendo gradualmente a medida que aumenta x' (ver Figura 35).

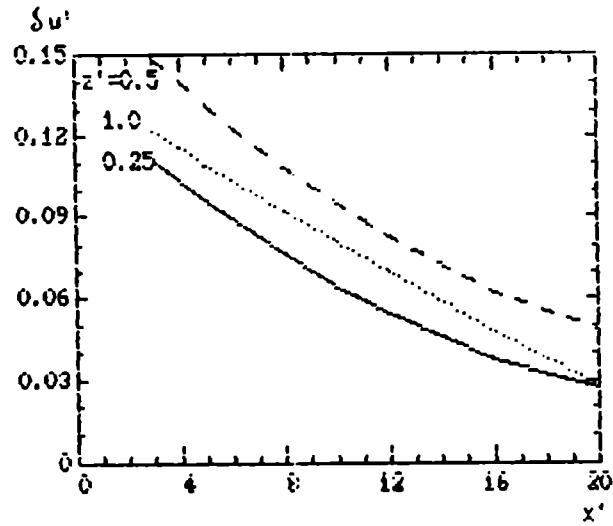


Fig. 33: Efecto de una variación del 100% en z_0 sobre la velocidad relativa en función de la distancia (x').

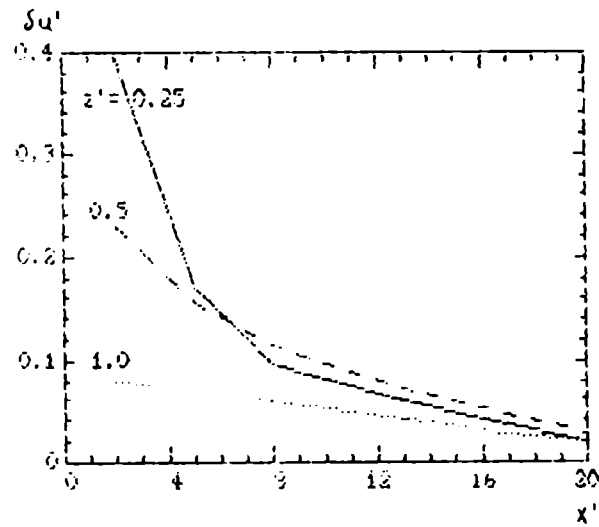


Fig. 34: Efecto de una variación del 50% en la altura de la cortina sobre la velocidad relativa en función de la distancia (x').

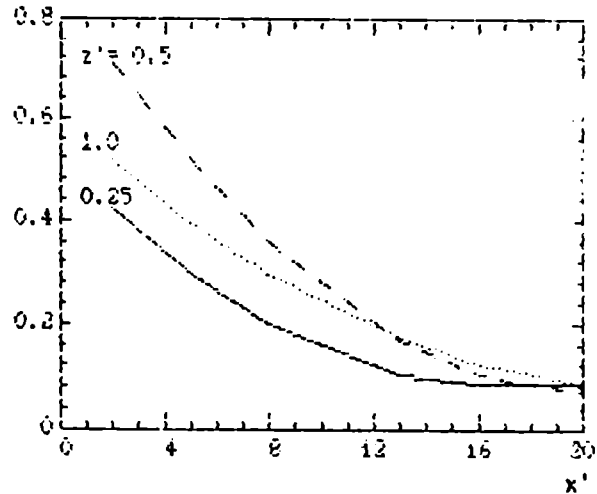


Fig. 35: Efecto de la variación de un 50% en la porosidad sobre la velocidad relativa del viento.

5.1 Análisis de propagación de errores del modelo

Con el fin de obtener el efecto de los errores de medición o estimación de las variables que intervienen en el cálculo de u' se realizó un análisis de la propagación de errores producidos por el sistema de ecuaciones que componen el modelo propuesto. El comportamiento de u' respecto de los parámetros incluidos en las expresiones (81) a (84) está resumido en la Tabla XVI, en donde el cambio fraccional de u' está dado por:

$$\frac{\Delta u'}{u'} = K \frac{\Delta N}{N} \quad (86)$$

donde N representa a cualquier parámetro incluido en las ecuaciones (81) a (84) y K es un coeficiente que dependerá de la ecuación y del

parámetro respectivo.

En la Tabla XVI se puede observar que, para los tres niveles z' , los coeficientes correspondientes a P y z' son mayores y disminuyen con la distancia. En el caso del coeficiente de H , en general, aumenta o se mantiene casi constante con la distancia, siendo mayor que los otros dos cuando $x' = 20$, $z' = 0.25$ y $20\% = P = 40\%$ y $z' = 0.5$.

Del análisis de los coeficientes K se desprende que el error relativo en las mediciones o estimaciones de z' , y H se reflejan en menor proporción sobre el error relativo de u' . En el caso de error en la medición de P , su efecto sobre el error de u' se incrementa, ya que en este caso el coeficiente K es mayor que 1.

6 COMPARACION DEL MODELO SEMIEMPIRICO CON DATOS OBSERVACIONALES

6.1 Introducción.

El incremento del número de modelos de simulación de procesos atmosféricos, en particular en lo relacionado con la calidad del aire utilizados en reglamentaciones, ordenanzas y leyes, determinó el desarrollo de métodos estadísticos destinado a su evaluación. Las técnicas para evaluar la ejecución de modelos ha sido resumida por Fox (1981) e incluye el análisis de residuos que permite una estimación cuantitativa de $(\bar{O}-\bar{E})$ y la correlación que posibilita la obtención de una medida de las concordancias entre los valores observados (O) y estimados (E).

Los métodos del análisis residual incorporados por Fox (1981), incluyen:

1. El error sesgado medio (ESM):

$$ESM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (87)$$

2. La varianza de la distribución de diferencias (S_d^2):

$$S_d^2 = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i - ESM)^2 \quad (88)$$

3. El error cuadrático medio (ECM) o su raíz cuadrada (RECM):

$$ECM = N^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \quad (89)$$

$$RECM = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (90)$$

4. El error absoluto medio (EAM):

$$EAM = N^{-1} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (91)$$

donde O es el valor observado, E el valor estimado y N el número de pares de datos.

Los métodos para analizar la correlación propuestos por Fox (1981) son los siguientes:

- (1) Correlación temporal ($r_{\Delta t}$) donde r es el coeficiente de correlación.
- (2) Correlación espacial ($r_E \pm f(O(x,t); E(x,t))$).
- (3) Combinación espacio-temporal.

Willmott (1982a) propuso algunas modificaciones a las recomendaciones de Fox (1981) que son resumidas a continuación.

Willmott y Wicks (1980) presentaron algunos datos de precipitación con valores de r y r^2 estadísticamente significativos pero no relacionados con O - E. Asimismo, mostraron que pequeñas diferencias entre O y E podrían presentarse con valores bajos y negativos de r. Los coeficientes r y r^2 describen cambios proporcionales (aumento o disminución) con respecto a la media de los dos parámetros. Sin embargo, las diferencias entre el tipo o la magnitud de las variables no son indicadas por r. Otros trabajos (ver Willmott, 1982b), también mostraron como el valor unitario de r y r^2 pueden ser erróneo en la interpretación de la exactitud de un modelo. Por otra parte, Venkatram y Paine (1985) indicaron que el análisis de la correlación es de poco valor si la varianza observada es similar a la varianza esperada entre las predicciones del modelo y las observaciones.

Willmott (1981, 1982a, 1982b) propone la utilización de un índice de concordancia (d) y de RECM para superar los problemas asociados con los coeficientes de correlación, ESM y S_d^2 .

El índice de concordancia propuesto por Willmott puede ser interpretado como una medida de la estimación "sin error" de una variable desde un modelo. De esta manera, el índice d determina las

diferencias que alcanzan las magnitudes y los signos de los valores estimados respecto de 0 y las desviaciones estimadas respecto de \bar{O} . Se supone que 0 y \bar{O} no tienen error. La distancia máxima posible que dos observaciones pueden apartarse se puede describir mediante:

$$|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}| \quad (92)$$

Elevando al cuadrado la expresión (92) y sumando sobre todas las observaciones se encuentra una variación potencial del error (VPE) (ver Willmott, 1981) que satisface la siguiente condición:

$$0 \leq (\text{ECM})^2 \leq N^{-1} \text{VPE} \quad (93)$$

La medida del error relativo que indica el grado aproximación entre E y O puede ser definido mediante:

$$d = \frac{1 - \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E'_i| + |O'_i|)^2} \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (94)$$

donde $E'_i = E_i - \bar{O}$ y $O'_i = O_i - \bar{O}$. El error por exceso no explicado que queda está contenido en el numerador de (94). El índice d, por lo tanto, es sensible a las diferencias entre E y O. Asimismo, d está estandarizado tal que las comparaciones cruzadas entre magnitudes, pueden ser realizadas entre modelos. Si $d = 1$ indica que existe una concordancia perfecta entre los valores de O y E.

El parámetro d es conveniente que no sea interpretado sólo, debido a que se inestabiliza cuando el denominador es pequeño. Por esta razón es preferible utilizar d en conjunto con las medidas de las diferencias tales como el error cuadrático medio y sus dos componentes: el error cuadrático medio sistemático $(\text{ECM})_S$ y el error cuadrático medio no sistemático $(\text{ECM})_N$. La mediciones de las

diferencias proporcionan la más rigurosa y útil información para encontrar la validación total del modelo. Sin embargo, los modelos contienen errores sistemáticos y no sistemáticos. Los errores sistemáticos son determinados por causas que ocurren consistentemente. Los errores no sistemáticos constituyen un número de pequeños efectos tales como la inclusión de una constante. Algunos de esos efectos son positivos y otros negativos y afectan el valor final.

El modelo más apropiado, por lo tanto, tiene una diferencia sistemática nula, debido que ésta explica la mayor parte de la variación sistemática de los valores observados, mientras que la diferencia no sistemática se aproxima al ECM. El error cuadrático medio debe ser minimizado tal que el modelo estime el valor máximo aproximadamente. Un valor relativamente grande del $(ECM)_N$ puede significar que el modelo es tan bueno como se lo permite las condiciones.

En términos matemáticos, el $(ECM)_S$ es el error causados por aspectos aditivos o proporcionales del modelo y puede ser expresado mediante:

$$ECM_S = N^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{E}_i - O_i)^2 \quad (95)$$

donde $\hat{E} = \hat{a} + b\hat{O}_i$ con \hat{a} y \hat{b} como coeficientes de regresión, y el $(ECM)_N$ mediante:

$$ECM_N = N^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E})^2 \quad (96)$$

Como el sistema es conservativo, se puede definir el ECM de la siguiente forma:

$$ECM = (ECM)_S + (ECM)_N \quad (97)$$

La raíz cuadrada del (ECM) , generalmente, es calculadas para realizar comparaciones cuali y cuantitativas. La RECM puede ser escrita como:

$$RECM = \sqrt{(RECM)^2 + (RECM)^2} \quad (98)$$

Juntamente con $(RECM)_S$, $(RECM)_N$ y d , es posible utilizar los valores medios tales como \bar{O} , \bar{E} , S_O^2 y S_E^2 .

En este trabajo, se siguen las recomendaciones de Fox (1981) y además se incluyen las medidas de las diferencias y el índice de concordancia (d) propuesto por Willmott (1982) para la evaluación de modelos.

Otro de los índices utilizados (ver Irwin y Smith, 1984) es el error fraccional (EF) que es derivado de la comparación del valor estimado (E) y el observado (O), según la siguiente expresión:

$$EF = 2(E - O)/(E + O) \quad (99)$$

El EF varía desde un máximo de 2 para una sobrestimación extrema a un mínimo de -2 para una subestimación límite.

La sobrestimación por un factor 2 es indicada por $EF = +0.67$ y la subestimación es dada por $EF = -0.67$.

Con el fin de completar el análisis de la validación se calculan dos estadísticos, la t de Student para la comparación de las medias y la F de Fisher para las varianzas.

6.2 Comparación del modelo con datos observacionales

6.2.1 Cortinas rompevientos con el 50% de porosidad

Con el fin de verificar el comportamiento de la expresión (67), obtenida para cortinas rompevientos de 50% de porosidad, se aplicó la misma a condiciones experimentales diferentes a la utilizadas para su desarrollo (ver Tabla V).

En la Figura 36 a 38 se graficaron los valores de las velocidades relativas del viento (u') obtenidos mediante la expresión (67) y los observados en función de la distancia (x') para diferentes alturas (z'). La Figura 36 corresponde a la comparación de los valores estimados (Tabla XVII) con los experimentales (Tabla XVIII) obtenidos por Maki (1983), la Figura 37 corresponde a la comparación de los valores estimados (Tabla XIX) con los experimentales de Raine (ver Hagen y otros, 1971) (TABLA I), en la Figura 38 se comparan los datos estimados (Tabla XX) con los obtenidos por Wilson (1987) (Tabla XXI).

En las Figuras 36 a 38 se observa que las mayores discrepancias entre los valores generados por el modelo y los observacionales se producen en los niveles inferiores y que, en general, hay una subestimación de los datos reales. Esto se corrobora con la comparación entre \bar{O} , \bar{E} , S_o y S_e (Tabla XXII), los errores fraccionales (ver Figura 39) y la comparación entre los valores calculados y observados y la recta de regresión ideal (Figura 40). Por otra parte, si bien la RECM no es nula resulta menor que la RECN (Tabla XXII). Esto, juntamente con los índices d y r^2 , permite inferir que el modelo es un buen estimador para el rango de velocidades observacionales utilizadas. Para completar la verificación del modelo se comparan las medias y las varianzas de los valores calculados y los observados. En el caso de la media se utiliza la t de student, para lo cual se supuso una hipótesis nula (H_o) tal que $\bar{O} = \bar{E}$. El valor calculado de la estadística resulta $t_o = 0.721$, el valor crítico (t) obtenido con 92 grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ resulta $t = 1.9867$, por lo tanto, como $t > t_o$ se puede aceptar la hipótesis de nulidad. Para el análisis de las varianzas utilizando

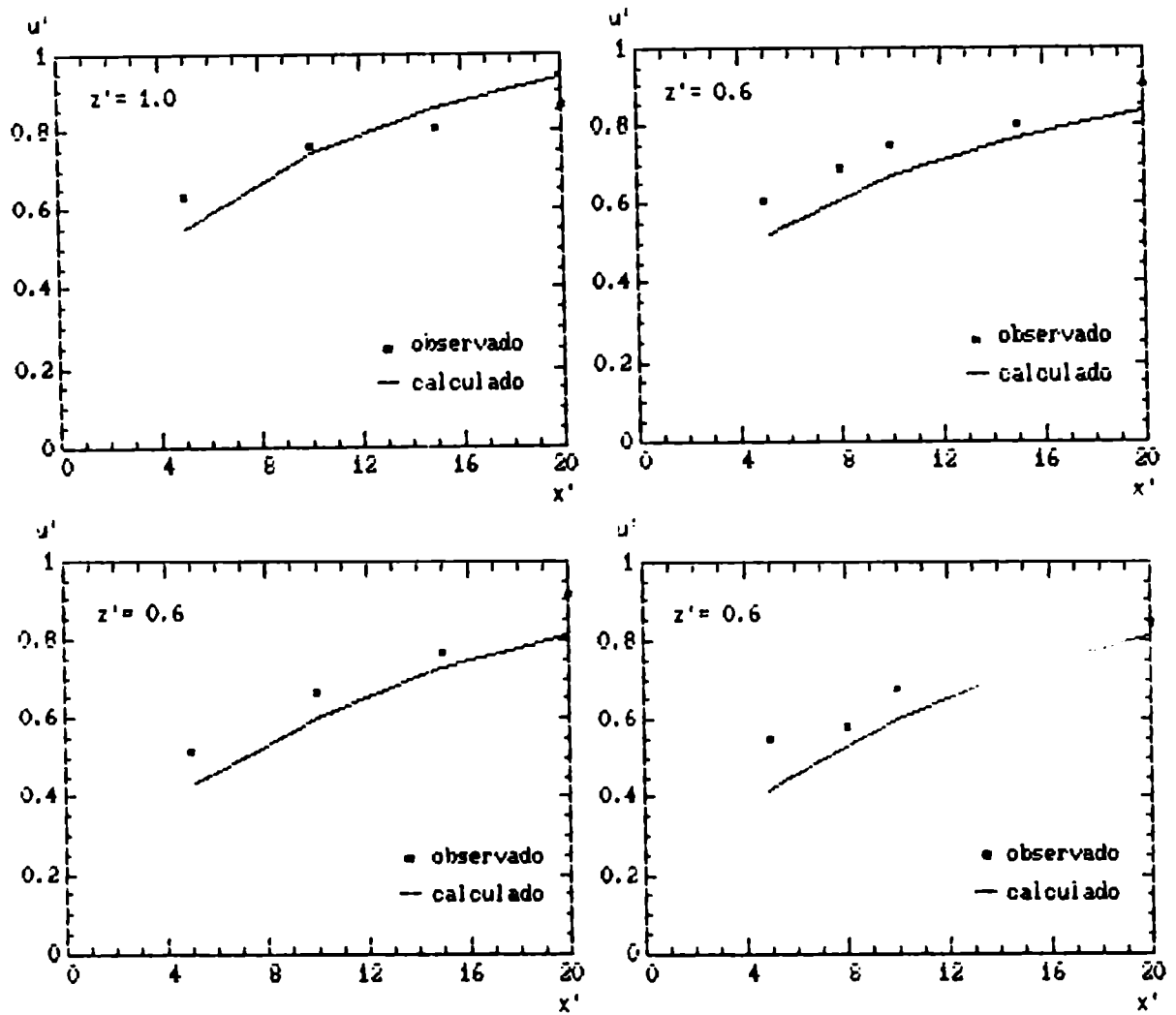


Fig. 36: Velocidades relativas (u') calculadas (—) y observadas (■) en función de la distancia para $z' = 1.0$ y 0.6 , correspondientes a las condiciones experimentales de Naki (1983).

la F de Fisher se quiere probar $H_0 : S_0^2 / S_\epsilon^2 = 1$. La estadística calculada es $F = 1.031$ y el valor crítico, con 47 grados de libertad y $\alpha = 0.05$, resulta $F_{47}(0.05) = 1.576$, por lo tanto, como $F < F_{47}(0.05)$ se acepta H_0 , es decir las varianzas son iguales con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

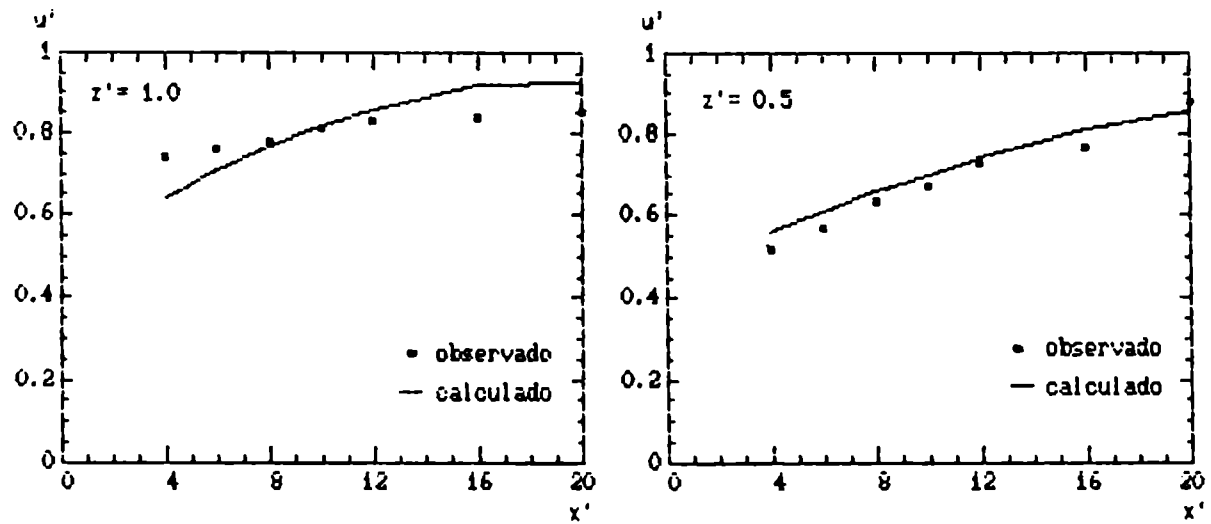


Fig. 37: Velocidades relativas (u') calculadas (—) y observadas (■) en función de x' para $z' = 1.0$ y 0.5 , correspondientes a las condiciones experimentales de Raine (ver P'agen y otros, 1981)

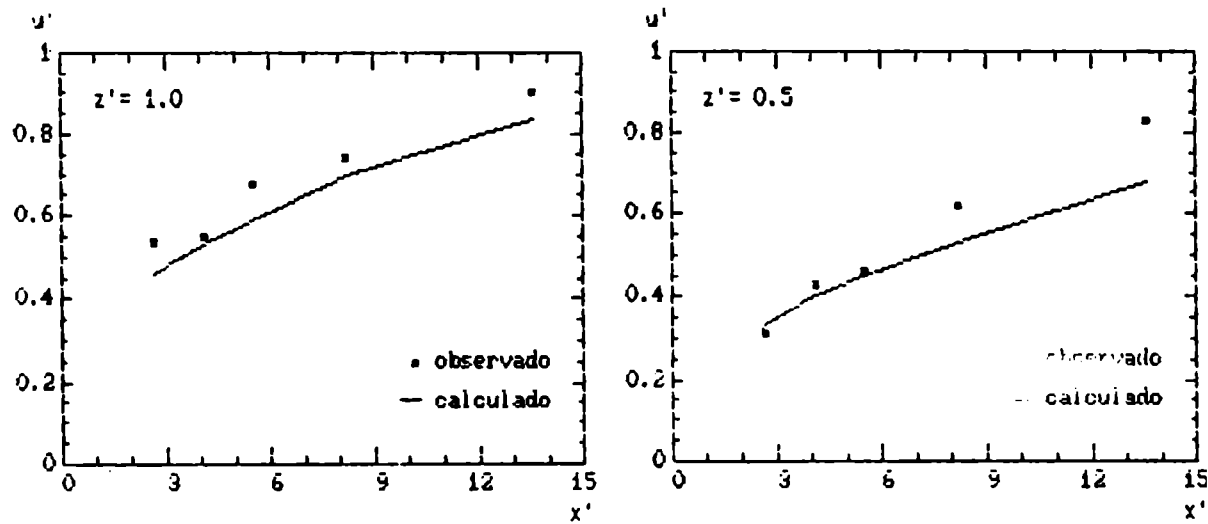


Fig. 38: Velocidades relativas (u') calculadas (—) y observadas (■) en función de x' para $z' = 1.0, 0.5$ y 0.25 , correspondientes a las condiciones experimentales de Wilson (1935).

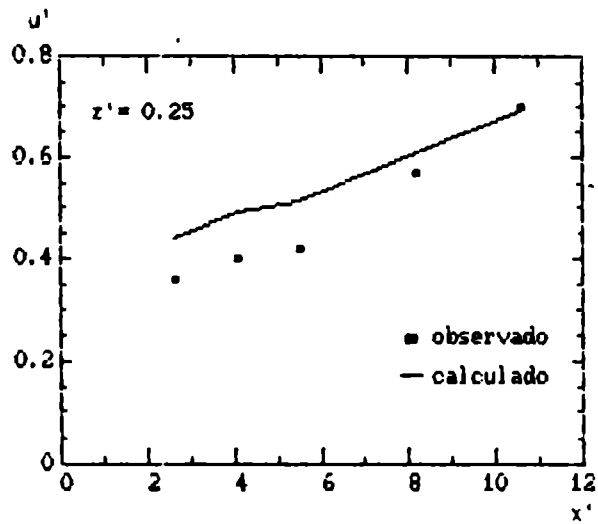


Fig. 38: Continuación.

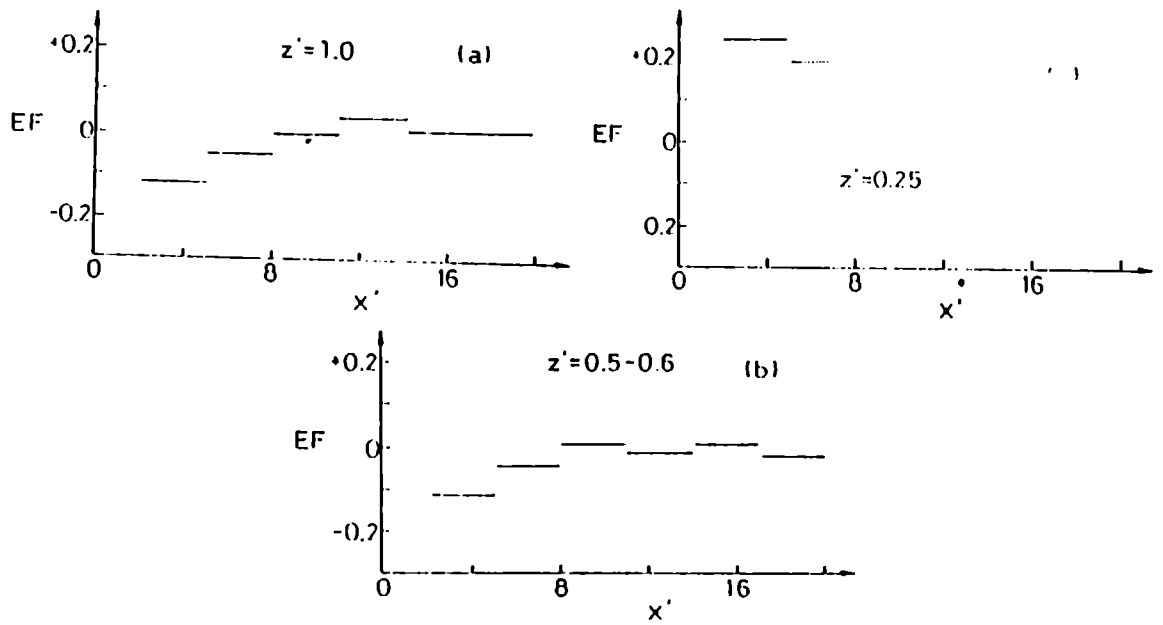


Fig. 39: Errores fraccionales (EF) correspondientes a la expresión (67): a) promediados por rangos de x' para $z' = 1$; b) promediados por rangos de x' para $z' = 0.05$ y 0.6 ; c) correspondientes a $z' = 0.25$.

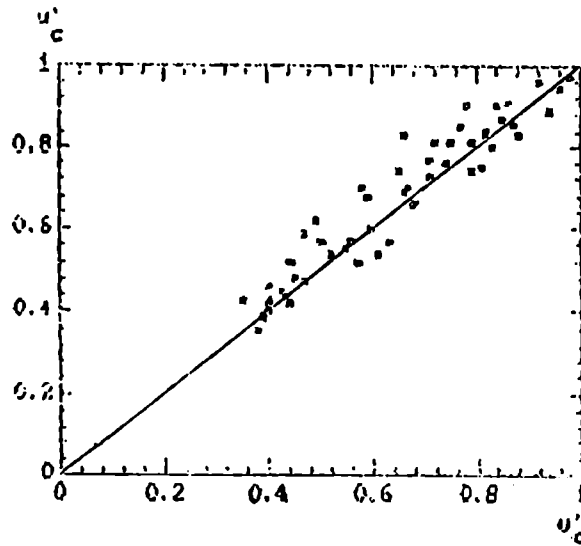


Fig. 40: Relación entre las velocidades relativas (u) calculadas (u_c) y observadas (u'_o) y la recta de regresión ideal.

6.2.2 Porosidad variable

Los resultados del modelo desarrollado para porosidad variable fueron comparados con diferentes experiencias de campo. Estos datos fueron diferentes a los utilizados para obtener el sistema de ecuaciones (81) a (84) (ver Tabla V)

En las Figuras 41 a 44 se graficaron los valores de velocidades relativas estimadas y experimentales en función de la distancia (x') y para $z' = 1.0, 0.5$ y 0.25 . La Figura 41 corresponde a la simulación (Tabla XXIII) de la experiencia realizada por Maki (1982) para $P = 50\%$ (Tabla VI) La Figura 42 corresponde a la comparación

entre los valores calculados (Tabla XXIV) y los observacionales obtenidos por Wilson (1987) (Tabla XXI), para lo cual utilizó una cortina de $P=50\%$, $H=112$ cm y $z_o = 1.5$ cm. En la Figura 43 se comparan los valores calculados (Tabla XXV) con los obtenidos en experiencia de campo por Maki y Kawashima (1985) (Tabla XXVI), con una cortina rompevientos de 30% de porosidad, $H=200$ cm y $z_o = 1.6 \cdot 10^{-3}$ cm. La Figura 44 corresponde a la simulación (Tabla XXVII) de la experiencia de Hagen y Skidmore (1971) (Tabla XXVIII) en la que se utilizó una cortina rompevientos de 244 cm de alto, 20% de porosidad y $z_o = 0.81$ cm.

En las Figuras 41 a 44 se observa que, en general, la mayor discrepancia entre los valores calculados y observados se presentan para $z' = 0.5$. Tanto para $z' = 0.5$ y 1.0 se produce una significativa diferencia en, aproximadamente $x' = 10$. El nivel $z' = 0.25$ es el que presenta la mayor concordancia entre los valores simulados y observados. Con respecto al comportamiento con la porosidad, se observa que, cuando esta disminuye los valores estimados se acercan a los experimentales. Del análisis de \bar{O} , \bar{E} , S_o , S_e (Tabla XXII), los errores fraccionales (ver Figura 45) y la comparación entre los valores calculados y los observados y la recta de regresión ideal (Figura 46) se desprende que el modelo, en general, sobreestima los datos reales, sin embargo, RECM, RECM, RECM, d y r (Tabla XXII) permiten inferir que el modelo es un buen estimador del viento relativo.

Por otra parte, el estadístico t para el análisis de las medias resulta $t_o = 0.793$ que comparado con el valor crítico, $t = 1.660$, obtenido con 102 grados de libertad y $\alpha = 0.05$, permite aceptar la hipótesis nula ($H_o : \bar{O} = \bar{E}$), es decir que las medias de ambas muestras son las mismas. El estadístico F de Fisher calculada resulta $F_o = 1.031$, el valor crítico con 51 grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ resulta $F_{51}(0.05) = 1.576$, por lo tanto, como $F_o < F_{51}(0.05)$ se acepta $H_o : S_o^2 / S_e^2 = 1$.

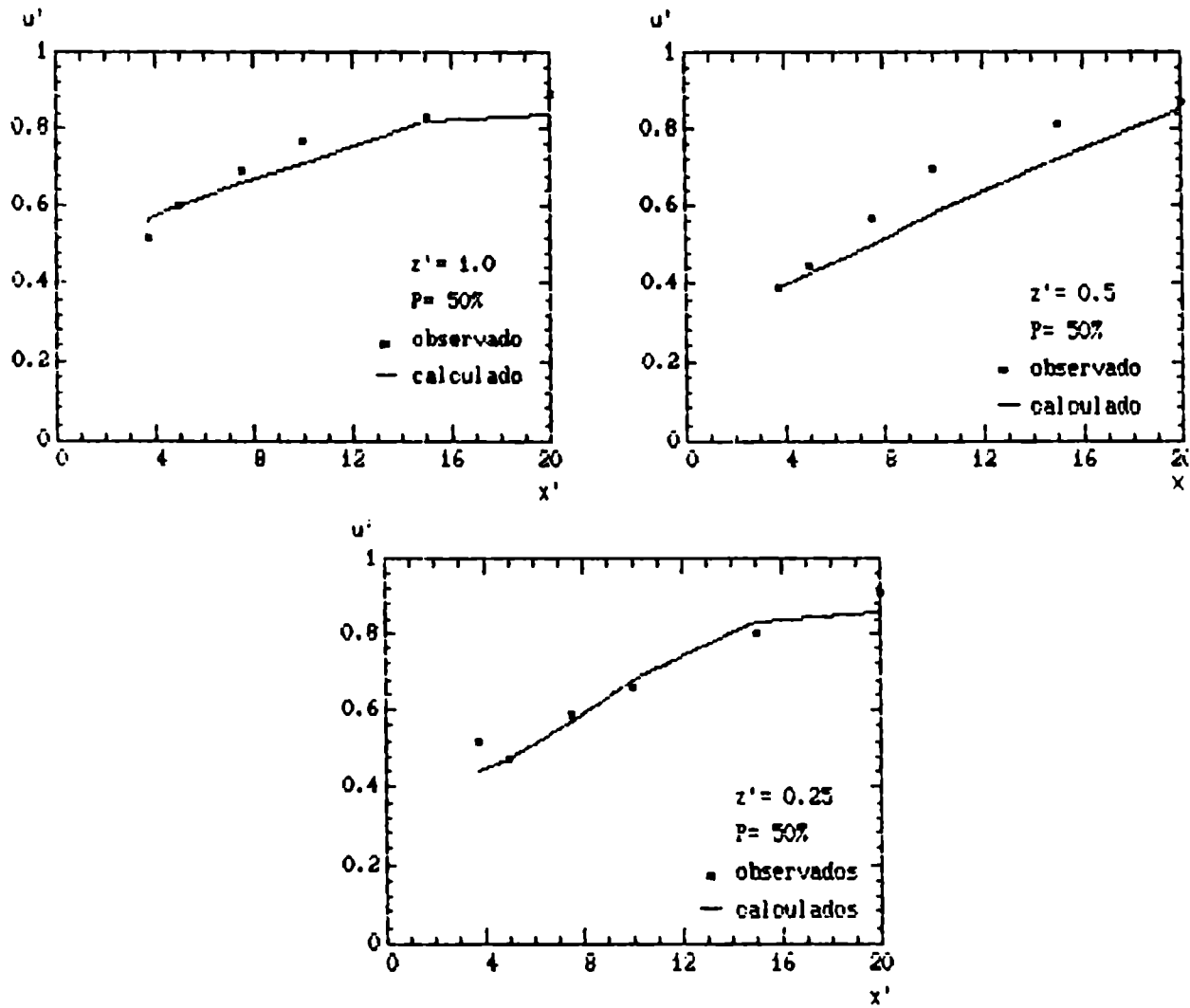


Fig. 41: Velocidades relativas (u') calculadas (—) y observadas (■) en función de x' para $z' = 1.0, 0.5$ y 0.25 , correspondientes a las condiciones experimentales de Maki (1982).

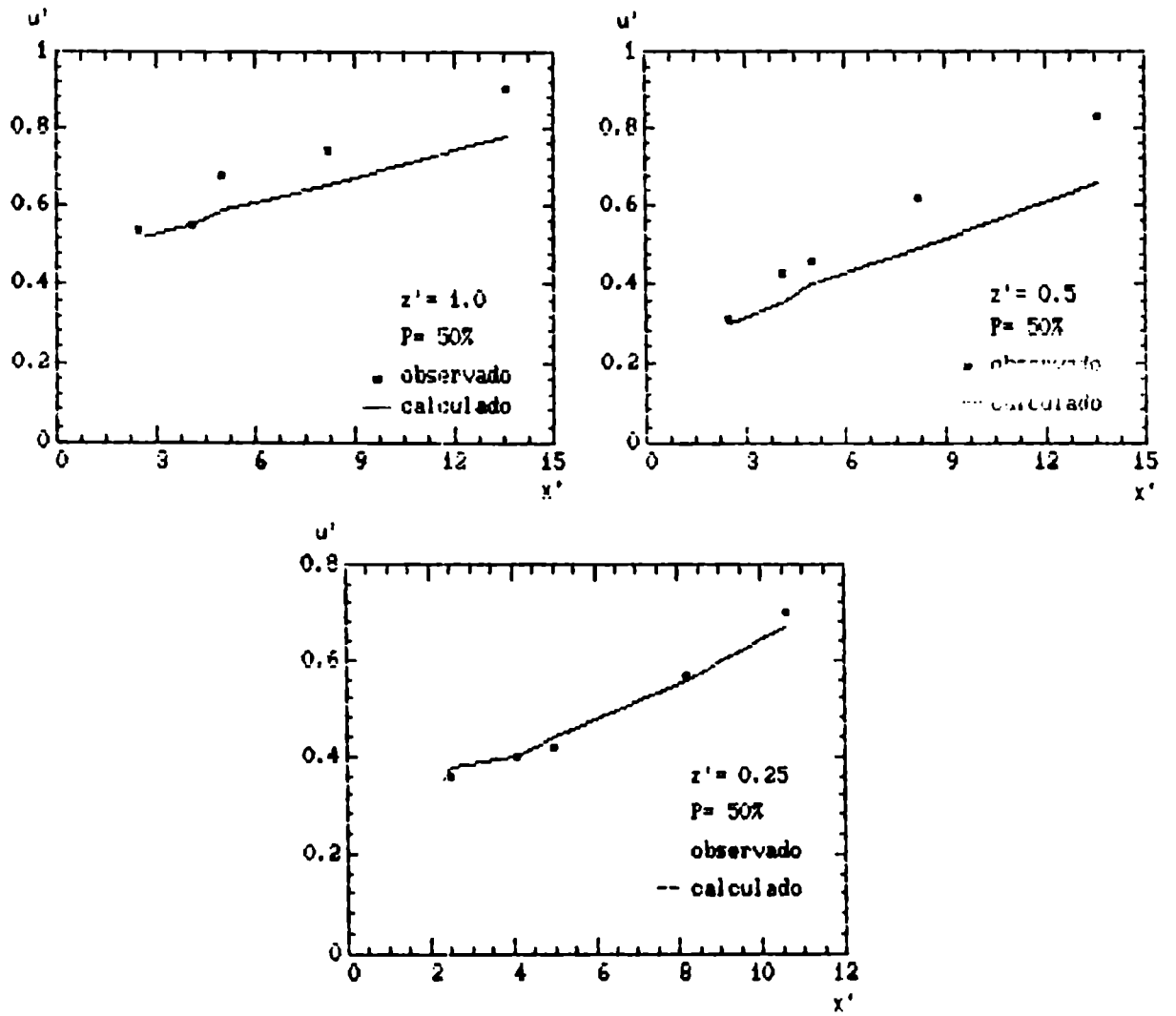


Fig. 42: Velocidades relativas (u') calculadas (—) y observadas (■) en función de x' para $z' = 1.0$, 0.5 y 0.25 , correspondientes a las condiciones experimentales de Wilson (1985).

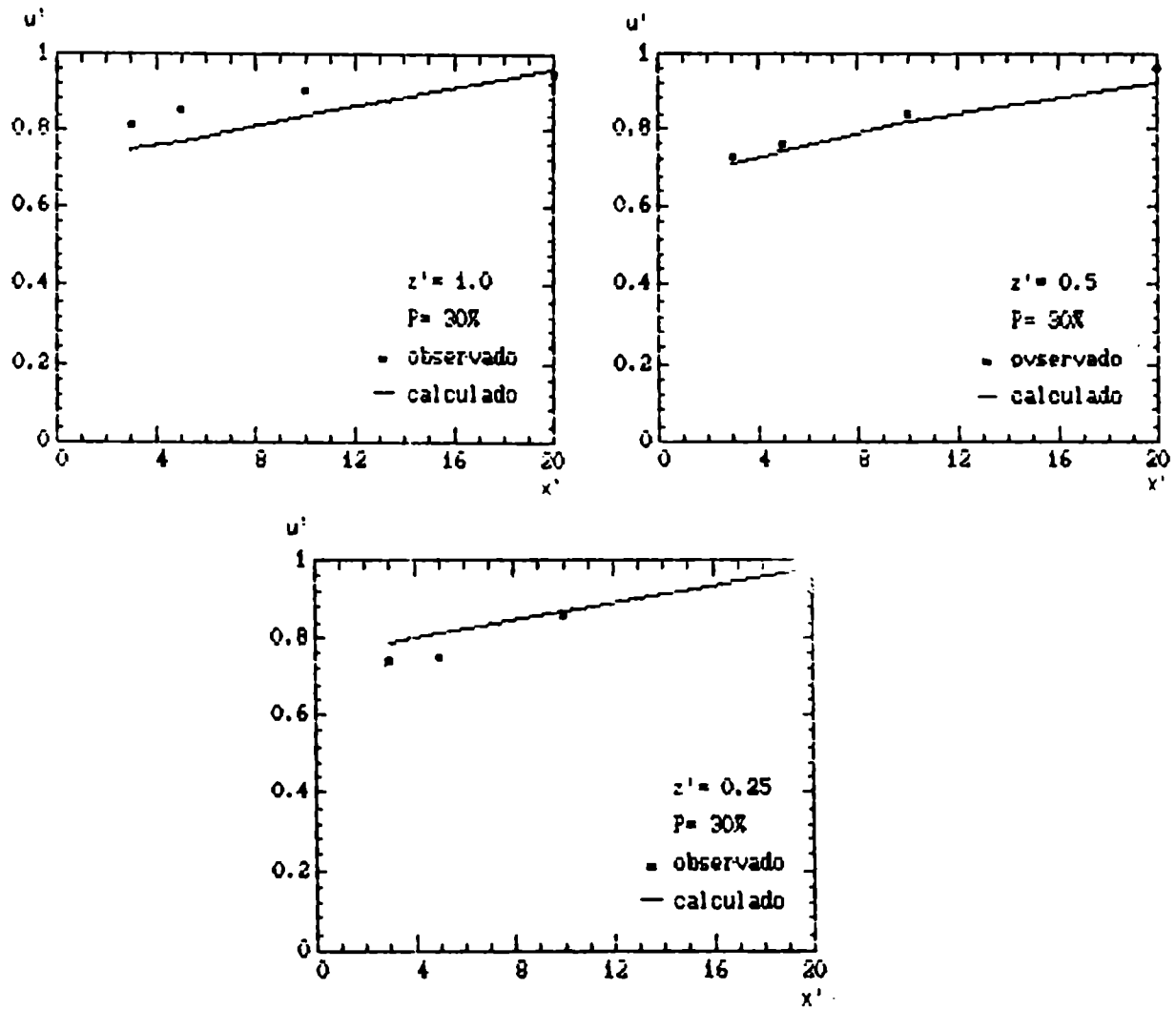


Fig. 43: Velocidades relativas (u') calculadas (—) y observadas (■) en función de x' para $z' = 1.0, 0.5$ y 0.25 , correspondientes a las condiciones experimentales de Maki y Kawashima (1983).

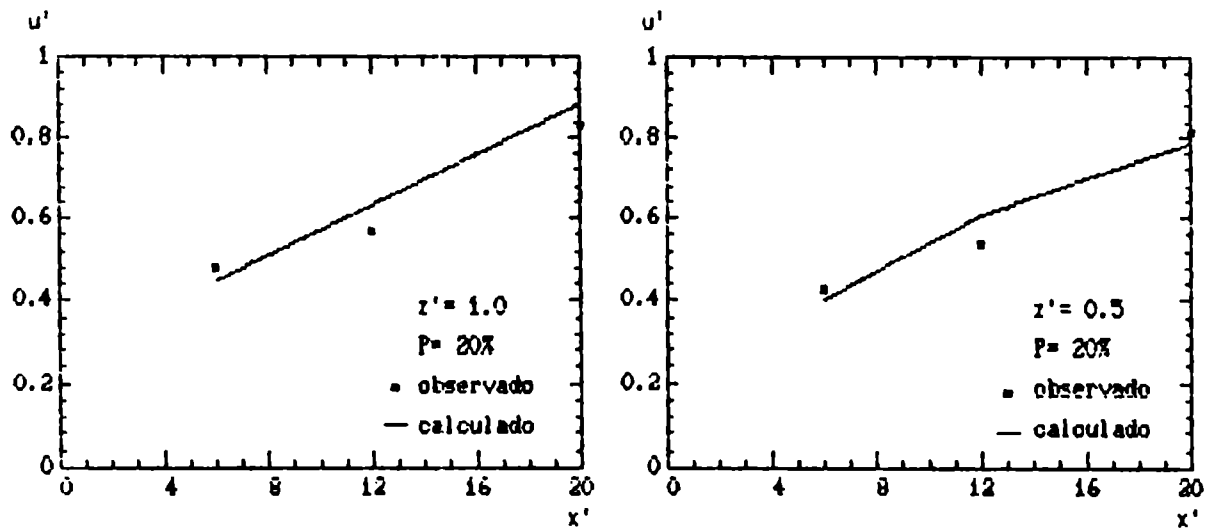


Fig. 44: Velocidades relativas (u') calculadas (—) y observadas (■) en función de x' para $z' = 1.0$ y 0.5 , correspondientes a las condiciones experimentales de Hagen y Skidmore (1971).

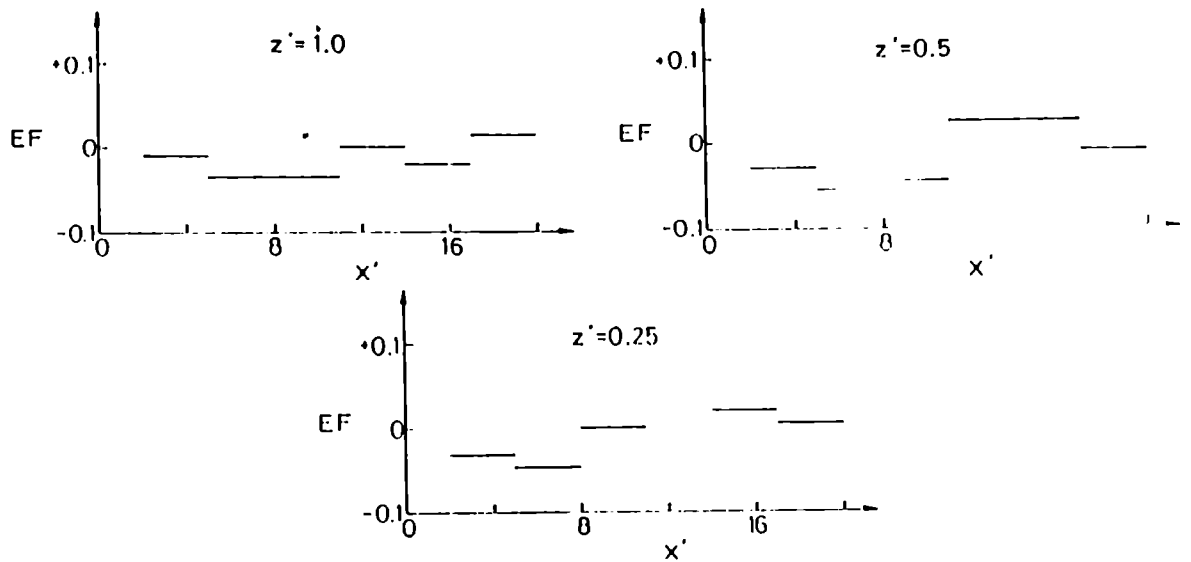


Fig 45: Errores fraccionales correspondientes a las expresiones (81) a (84): a) $z' = 1.0$; b) $z' = 0.5$; c) $z' = 0.25$.

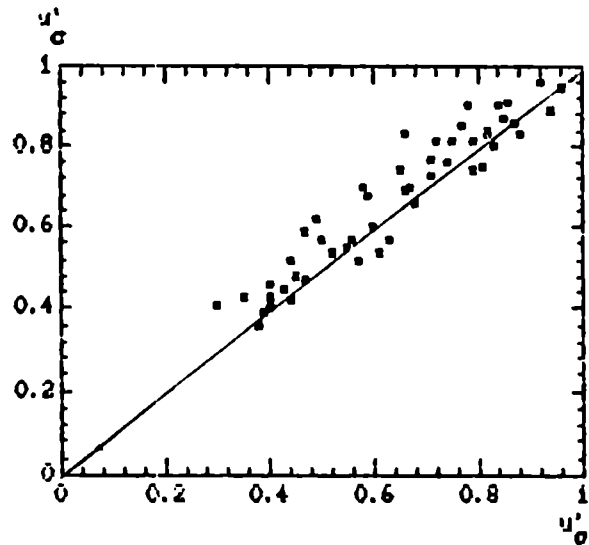


Fig. 46: Relación entre las velocidades relativas calculadas (u'_c) y observadas (u'_o) y la recta de regresión ideal

6.3 Discusión

Al interponer una cortina rompevientos al flujo del aire se producen modificaciones en la velocidad del viento, principalmente a sotavento de la misma, hasta una distancia aproximada de $20H$.

La disminución de la velocidad del viento y su posterior restitución, dependen de la estructura de la cortina (porosidad y altura), de las características aerodinámicas del terreno (representado por z_o) y de la estabilidad atmosférica (parametrizada por la longitud de estabilidad L_o).

Tanto la ecuación (67) como las (81) a (84) fueron desarrolladas suponiendo condiciones atmosféricas neutrales. Por otra parte, para la expresión (67) se supone una cortina rompevientos de porosidad del 50% y resulta válida para $2 \leq x' \leq 20$, $0.25 \leq z' \leq 1$ y $z'_o/H \leq 0.05$ y

flujo perpendicular a la cortina rompevientos.

Examinando la ecuación (67) se observa que la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos, depende de la altura z' , de la distancia x' adimensionalizada por la altura de la cortina (H) y de la longitud de rugosidad (z'_0).

De la comparación con datos experimentales se puede concluir que las velocidades relativas generadas por la ecuación (67) reproducen bastante bien los valores observacionales. Por otra parte, de la Tabla XXII se desprende que, en general, hay subestimación de los valores reales.

La inclusión de la porosidad de la cortina rompevientos da una mejor estimación de la reducción de la velocidad del viento a sotavento de la misma. Esto se debe a que se está considerando otra parte importante de la estructura de la cortina. Como se demostró en el Capítulo 5, la porosidad representa, indirectamente, el coeficiente de arrastre aerodinámico producido por la cortina rompevientos. Es decir, la porosidad de la cortina permite parametrizar su efecto mecánico sobre el flujo del aire. Por otra parte, la suposición de que a una cierta distancia de la cortina rompevientos es válido el perfil logarítmico del viento, permitió incluir el parámetro de rugosidad del terreno, que es un parámetro evaluable con menor cantidad de información que u_* . De esta forma se obtiene un modelo simple, compuesto por las expresiones (81) a (84), que permite estimar la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos y es válido para un flujo perpendicular a la cortina, porosidades comprendidas entre 20% y 50%, $2 < x' \leq 20$, $z' = 1, 0.5$ y 0.25 y $z_0/l_i \leq 0.02$.

En la Figura 47 se presenta una comparación entre los resultados del modelo propuesto, otro más complejo desarrollado por Hagen y otros (1971) descrito en el Capítulo 4 y datos experimentales. En la Figura se observa que, en el caso de una cortina rompevientos de 20% de

porosidad, los errores de la simulación del modelo propuesto son menores que los producidos por el modelo de Hagen y otros (1981) para $z'=1.0$ y prácticamente los mismos cuando $z'=0.5$.

Igual que en el caso de la ecuación (67), el sistema de ecuaciones (81) a (84) subestima los valores experimentales. Sin embargo, del análisis de los estadísticos presentados, de la comparación con otro modelo más sofisticado y la simplicidad de las ecuaciones obtenidas para la simulación del flujo del aire a sotavento de una cortina rompevientos, permite comprobar la bondad de modelo.

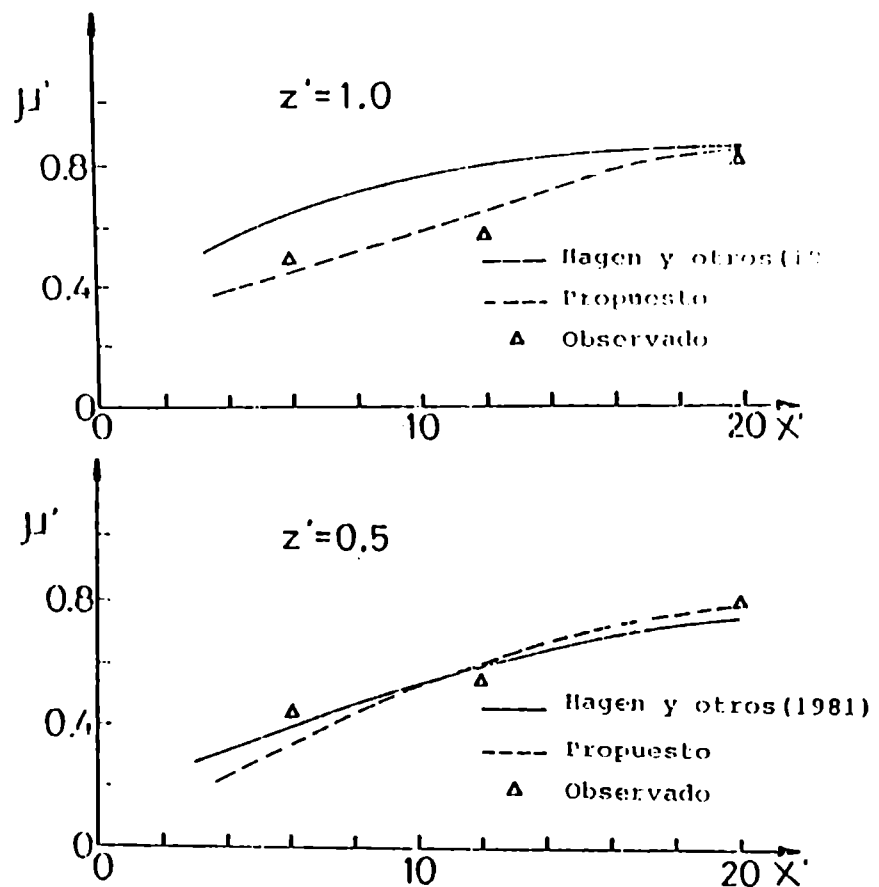


Fig. 47: Comparación entre el modelo propuesto (---), otro más complejo desarrollado por Hagen y otros (1981) (—) y datos experimentales (Hagen y otros (1981) (Δ)).


7. CONCLUSIONES

A partir de una modificación de la teoría de la semejanza euleriana de Monin-Obukhov se desarrolló un modelo semiempírico destinado a evaluar el efecto de una cortina rompevientos sobre el flujo del aire a sotavento de la misma. Para ello se propuso la inclusión como argumentos del análisis dimensional variables características de las cortinas rompevientos (altura y porosidad). Esto permitió construir un sistema de ecuaciones a partir del cual se obtiene la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos. Dicho modelo es válido en condiciones atmosféricas neutrales, tres niveles de z' (1.0, 0.5 y 0.25), distancias comprendidas entre $3H$ y $20H$ y porosidades entre 20% y 50%.

Del sistema de ecuaciones obtenido se desprende que la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos, puede ser simulada conociendo su altura y porosidad, de la distancia a la misma, de la altura y del parámetro de rugosidad.

La comparación de los resultados del modelo con datos experimentales permite inferir que las expresiones propuestas representan con una buena aproximación la velocidad relativa del viento a sotavento de una cortina rompevientos.

La simplicidad de las ecuaciones obtenidas como función de parámetros cuya estimación no resulta compleja y los resultados de la comparación con datos observacionales y otro modelo más complejo, permite asegurar una rápida y sencilla aplicación del modelo a problemas prácticos de planificación agrícola y urbana o su inclusión en modelos de evapotranspiración, erosión eólica o pronóstico de rendimiento de cultivo.



REFERENCIAS

- Brown, K.W. and Rosemberg, N.J., 1971: Effect of windbreak and soil water potential on stomatal diffusion resistance and photosynthetic rate of sugar beets (*Beta vulgaris*). Agr. J., 62: 4-8
- Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Bradley, E.F., 1971: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. J. Atm. Sc. 28: 181-189.
- Calder, K.L., 1966: Concerning the similarity theory of Monin-Obukhov. Quart. J. R. Met. Soc. 92: 141-146
- Fox, D.G., 1981: Judging air quality model performance: A Summary of the AMS Workshop on Dispersion Model Performance. Bull. Am. Meteorol. Soc., 62: 599-609
- Fraser, A.I., 1964: Wind tunnel and other related studies of coniferous trees and trees crops. Scott. Forest. 18, 84-92.
- Gate, D.M. and Papian, L.E., 1971: Atlas of energy budgets of plant leaves. Academic Press, New York.
- Good, M. C. and Joubert, P.N., 1968: The form drag of two dimensional bluff plates immersed in turbulence boundary layer. J. Fluid Mech. 31: 547-582.
- Grace, J., 1981: Plant and wind, en Plant an their Atmospheric Environment, pp 31-56. Ed. J. Grace, E.D. Ford and P.G. Jarvis, Brackwell Scientific Publications, London.
- Grace, J., 1977: Plant response to wind. Academic Press. London.
- Hagen, L.J. Skidmore, B.L. Miller, P.L. and Kipp, J.E., 1981: Simulation of effect of wind barriers on airflow. Trans. ASAE 24:1022-1008.
- Hagen, L.J. and Skidmore, B.L., 1971: Turbulent velocity fluctuations and vertical flow as affected by windbreak porosity. Trans. ASAE 14: 634-637.
- Hughes, W. and Brighton, J.A., 1970: Dinámica de fluidos. Ed. Mc.

Craw-Hill.

- Irwin, J. and Smith, M., 1984: Potentially useful additions to the rural model performance evaluation. Bull. Am. Met. Soc. 65: 559-558
- Jensen, M., 1954: Shelter effect. Danish Techn. Press, Copenhagen.
- Landau, L.D. and Lifshitz, E.M., 1959: Fluid mechanics. Pergamon Press.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1972: Mathematical model of turbulence. Academic Press. New York.
- Maki, T., 1985: Effects on the micrometeorological modification and wind erosion prevention by a windbreak net at the bare ground field in winter and spring. J. Agr. Met. Japan 40:323-330.
- Maki, T. and Kawashima, I., 1983 Studies on windbreak nets (7): Warming of surface leaf-soil temperature, decrease of wind speed and aerodynamic change of micro-structure of influenced by a windbreak at a grassland. J. Agr. met. Japan 39: 79-89.
- Maki, T., 1982: Studies on the windbreak nets: Micrometeorological modification of a cool weather damage of paddy rice and turbulence characteristics influence by windbreak nets. Bull. Nat. Inst. Agric. Sc. Japan A-29: 1-45.
- Maki, T., 1980: Studies on the windbreak nets (2): Micrometeorological modification of cool weather damage of paddy rice displayed by two kinds of windbreak nets. J. Agr. Met. Japan 36: 161-172.
- Mazzeo, N.A., 1982: Característica de la turbulencia en la capa de superficie de la atmósfera. Pub. Int. N 2, Depto de Met. FCEyN -UBA-.
- Meroney, R.N., 1968: Characteristics of wind and turbulence in and above model forests. J. Appl. Met. 7: 780-787.
- Miller, D.R. Rosemberg, N.J. and Bagley, W.T., 1975: Soybean water use in the shelter of a slat-fence windbreak. Agric. Met.

14: 321-333.

- Monin, A.S., 1972: Weather Forecasting as a problem in physic. The M.I.T. Press.
- Monin, A.S. and Obukhov, A.M., 1954: Basic turbulence-mixing relationships in the surface layer of the atmospheric. Tr.Geofiz, In-Ta Akad., USSR, 24: 1-14.
- Monteith, J.L., 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London.
- Monteith, J.L., 1965: Light distribution and photosynthesis in field crops. Ann. Bot. 29: 17
- Oke, T.R., 1982: Boundary Layer Climat. Methuen, London.
- Panofsky, H. and Dutton, J.A., 1984: Atmosphere Turbulence. John and Sons, New York.
- Plate, E.J., 1971: The aerodynamic of shelterbelts. Agric. meteorol. 8: 203-222
- Plandtl, L., 1952: Essential of fluid dynamics. Hafner Pub. Co.
- Raine, J.K., 1974 Wind protection by model fence in a simulated atmospheric boundary layer. Fifth Australasian Conf. on Hydraulics and Fluid mech., Univ. of Canterbury Christchurch, New Zeland, pp 200-210.
- Fey Pastor, J., Pi Caileja, P. y Trejo, C.A., 1965: Análisis Matemático Vol III. Ed. Kapelusz.
- Rosenberg, N.J., Blod, E.T. and Verma, H., 1983: Microclimate: The Biological Environment. Academic Press.
- Rosenberg, N.J., 1966: Influence of snow fence and corn wind-break on microclimate and growth of irrigate sugar beets. Agr. J. 58: 469-475.
- Seginer, I. 1975: Atmospheric stability effect on windbreak shelter and drag. Boundary Layer Meteorol. 8: 383-400.
- Seginer, I. and Sagi, R., 1972: Drag on windbreak in two dimensional flow. Agric. meteorol. 9: 323-333.

- Sutton, O.G., 1977: Micrometeorology. Ed. Mc Graw-Hill.
- Tani, N., 1963: The wind over the cultivated field. Bull. Nat. Inst. Agric. Sc. Japan A-10: 1-99.
- Thom, A.S., 1975: en "Vegetation and Atmosphere" (Ed. J.L. Monteith) Vol I: 57-109. Academic Press, London.
- Thom, A.S., 1968: The exchange of momentum, mass and heat between an artificial leaf and the air flow in a wind tunnel. Q.J.R. Met. Soc. 94: 44
- Venkatram, A. and Paine, R., 1985: A model to estimate dispersion of elevated releases into a sheer dominated boundary layer. Atm. Env. 19.11: 1797-1805.
- Winn Nielsen, A., 1974: Compendio de meteorología, Vol 1. (Ed. Wiin Nielsen), Nota técnica OMM N 364.
- Willmott, C.J., 1982a: On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. Solar Energy 28:205-216.
- Willmott, C.J., 1982b: Some comments on the evaluation of model performance . Bull. Am. Met. Soc. 63: 1309-1313.
- Willmott, C.J., 1981: On the validation of models. Phys. Geog. 2: 184-194.
- Willmott, C.J. and Wicks, D.E., 1980: An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. Phys. Geogr. 1: 59-73.
- Wilson, J.D., 1987: On the choice of windbreak porosity profile. Boundary Layer Met 38: 37-49.
- Wilson, J.D., 1985: Numerical studies of through a windbreak. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn 21: 119-154.
- Wilson, S.J. and Cooke, F., 1980: Soil Erosion. Ed. M.J. Kirkby and R.P. Morgan. John Wiley and Sons Ltd.
- Woodruff, M.P. Fryrear, D.W. and Lyles, L., 1963: Engineering similitude and momentum transfer principles applied to shelter-

- belt. Trans. ASAE 6: 41-47.
- WMO, 1981 Meteorological aspects of the utilization of wind as an energy source T.N. 175.
 - van Eirmern, J. Karschon, R., Razumova, L.A. and Robertson, G.W., 1964: Windbreak and shelterbelts. WMO Tech. Note N 59, 188pp.
 - Zeljkovich, L. González, M.C. y Golberg, A.D., 1976: Estudios de cortinas rompevientos en Pergamino : potencial agua y crecimiento del maíz. Revista de la Facultad de Agronomía, Univ. Nac. La Plata, Tomo 52: 1-19.
 - Zeljkovich, L. y Coca, M., 1979: La protección con rompevientos su incidencia sobre la productividad de la soja. Informe técnico N° 157, Instituto Nac. de Tec. Agropecuaria.
 - Zierop, J., 1971: Similarity laws and modeling. Ed Peter P. Wegener. Marcel Dekker Inc., New York.

ANEXO I

ANALOGIA ENTRE LA RESISTENCIA ELECTRICA Y LA DIFUSIÓN DE GASES A TRAVES DE POROS ESTOMATICOS

Cuando las hojas transpiran, el agua evaporada de la pared celular es liberada a la atmósfera desde la cavidad subestomática, a través de los poros estomáticos, por difusión y finalmente, trasladada a la atmósfera libre a través de la capa límite de la hoja. Por otra parte durante la fotosíntesis, las moléculas de dióxido de carbono se difunden desde la atmósfera libre hacia el interior de la hoja. La resistencia ofrecida por la capa límite a la difusión de un gas dependerá de las dimensiones de la hoja y de la velocidad del viento. La resistencia ofrecida por el estoma es función sólo de la geometría, tamaño y espaciamiento de los poros, decir, de las características anatómicas de las hojas.

Utilizando la analogía eléctrica, es posible describir los procesos de difusión que se llevan a cabo desde los espacios intercelulares de las hojas y a través de los poros estomáticos, a la capa límite externa de la misma.

La Figura 1.1 presenta un esquema simple del flujo de corriente eléctrica a través de una delgada lámina de metal entre dos electrodos xx e yy representado por líneas de puntos. La resistencia de la lámina será de 6 ohms cuando la diferencia de potencial entre los dos electrodos es de 6 voltios y el flujo de corriente entre ellos sea de 1 ampere. Las líneas horizontales representan puntos de igual diferencia de potencial a través de la placa y por simetría del sistema, estas líneas equipotenciales son paralelas a los electrodos. Entre cada par de líneas adyacentes, la caída diferencia de potencial será igual a 1 si el material entre ellos tiene una resistencia de 1 ohm. El flujo de corriente está representado por las líneas llenas

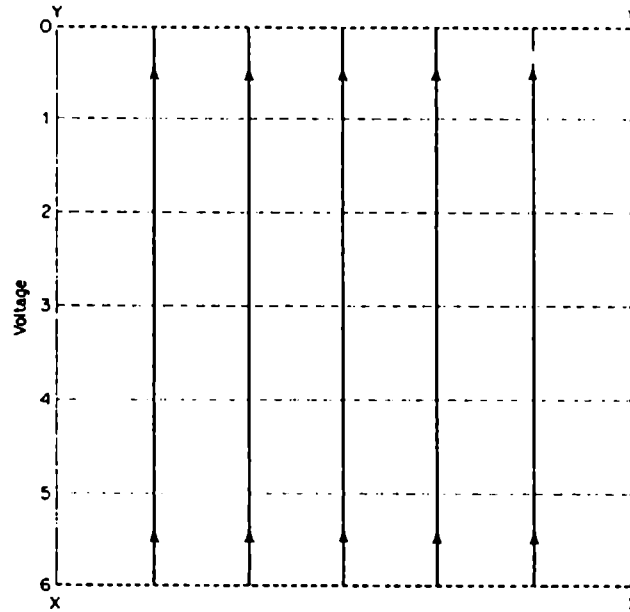


Fig. 1.1: Analogía eléctrica bidimensional de difusión entre planos paralelos xx e yy (— flujo de corriente; --- igual potencial).

(donde las flechas indican el sentido) que forman un ángulo recto con las equipotenciales.

La distribución de líneas equipotenciales en un sistema más complejo puede ser determinado usando una hoja de papel impregnado en grafito, de esta forma el papel conducirá electricidad pero, su resistencia será relativamente grande. La Figura 1.2 muestra las líneas sobre la hoja con dos electrodos paralelos de 60 cm de largo y 60 cm de separación. La hoja fue cortada a lo largo de una línea media entre los dos electrodos de tal forma que el flujo de corriente esté confinado en un polo. El camino por el cual el flujo de corriente converge sobre el polo forma un ángulo recto con las líneas equipotenciales. La resistencia adicional producida por el corte puede

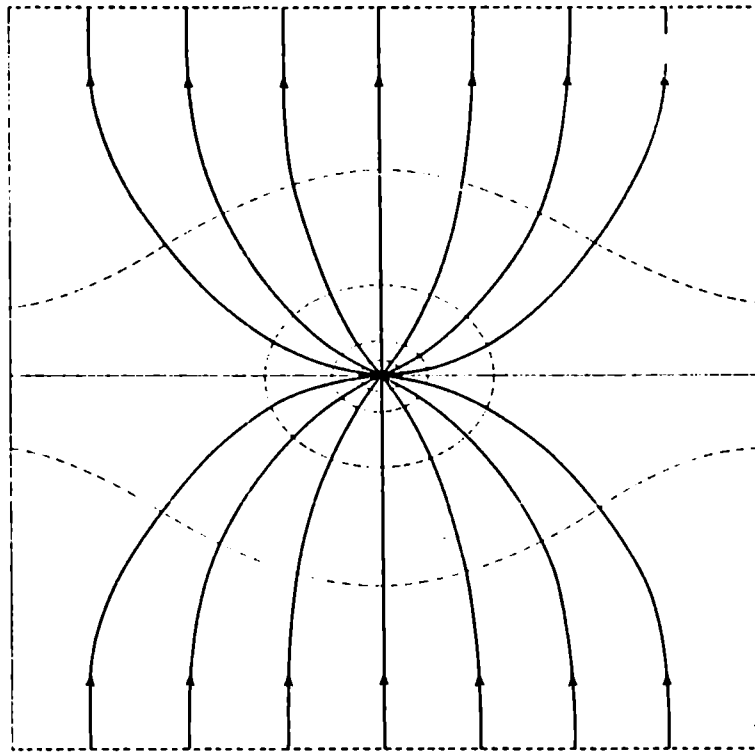


Fig. 1.2: Analogía eléctrica bidimensional de difusión entre dos planos cuando se introduce una placa entre ellos.

ser determinada por el número de líneas equipotenciales, que están separadas por resistencias unitarias como muestra la Figura 1.2.

Para la lámina completa hay 6 líneas, para el caso de la lámina cortada hay 16 (algunas de ellas fueron omitidas para una mayor claridad). Por lo tanto en el caso de la lámina cortada se introducen 10 unidades adicionales de resistencias o 5 unidades para cada lado del polo.

La Figura 1.2 puede ser considerada como una analogía bidimensional del proceso de difusión de un gas a través de un orificio de diámetro d en una placa de espesor menor que d .

De acuerdo con el proceso bidimensional de la difusión de gases,

la resistencia de ambas caras del orificio circular es $r_h = d/8D$, donde D es el coeficiente de difusión del gas. En la analogía bidimensional, estas cantidades corresponden a 5 unidades de resistencias. La resistencia en una capa límite laminar de espesor t resulta $r_a = t/D$ y corresponde a 3 unidades en la analogía.

Para desarrollar una analogía estomática es necesario considerar un poro de longitud l y diámetro d . Cuando se realiza la analogía con el papel impregnado en grafito con $l = 10$ mm y $d = 7$ mm el número de líneas equipotenciales se incrementa de 16 a 26. Las 10 líneas adicionales se producen dentro del poro y forman ángulos rectos con las paredes.

En tres dimensiones la resistencia equivalente de difusión r_p para las líneas equipotenciales dentro de un poro uniforme es $r_p = l/D$. La resistencia total en un poro r_t resulta $r_t = r_p + 2r_h$. Para un estoma r es, en general, mucho mas pequeña que r y por ello está referida como una "corrección final".

La Figura 1.3 muestra la sección transversal de un poro real y la cavidad subestomática de una hoja de Zebina pendula. Como la sección transversal no es uniforme, la resistencia del poro no puede ser calculada con exactitud si no se conoce la forma de la sección transversal y su área A para diferentes distancias a partir de la parte superior del poro.

Un valor aproximado de r puede ser obtenido a partir de la longitud y el diámetro medio de un poro con sección circular o a partir de los ejes de un poro elíptico. La corrección final para un poro circular resulta $2r = d/4D$ donde d es un diámetro representativo. Sin embargo, la Figura 1.3 muestra que podría ser incorrecta una corrección final convencional para el interior y la parte externa de un poro. Si se supone que la cavidad subestomática está revestida con las paredes de la célula a partir de cuales el agua es evaporada, la resistencia de la parte exterior del poro es

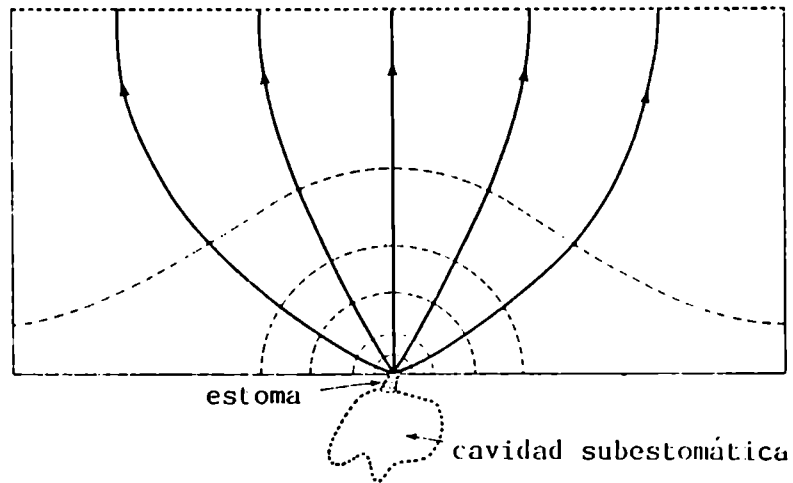


Fig. 1.3: Analogía eléctrica de difusión de vapor de agua de poro estomático de una hoja simple

equivalente a 6 líneas equipotenciales, pero el interior tiene sólo 2 líneas de equipotenciales. Para algunas hojas, $r_t = r_p + r_h$ es probablemente un mejor estimador de la resistencia de un poro simple que $r_t = r_p + 2r_h$.

Por lo general el mesófilo de una hoja tiene aproximadamente 100 estomas por mm^2 con una separación promedio de 0.1 mm, un orden de magnitud mayor que el diámetro máximo de un poro. Sobre este espaciamiento, hay pequeñas interferencias de líneas equipotenciales de poros individuales (Figura 1.4).

Cuando hay n poros por unidad de área de hoja, la resistencia de un grupo de poros r_s puede ser rápidamente obtenida a partir de la resistencia de los poros individuales r_t . Por ejemplo, si δx es la diferencia de concentración de vapor de agua mantenida a través de un grupo de poros circulares con un diámetro medio d , la transpiración puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$E = \delta x / r_e = \frac{n\pi(d^2/4)}{r_s} \quad (1.1)$$

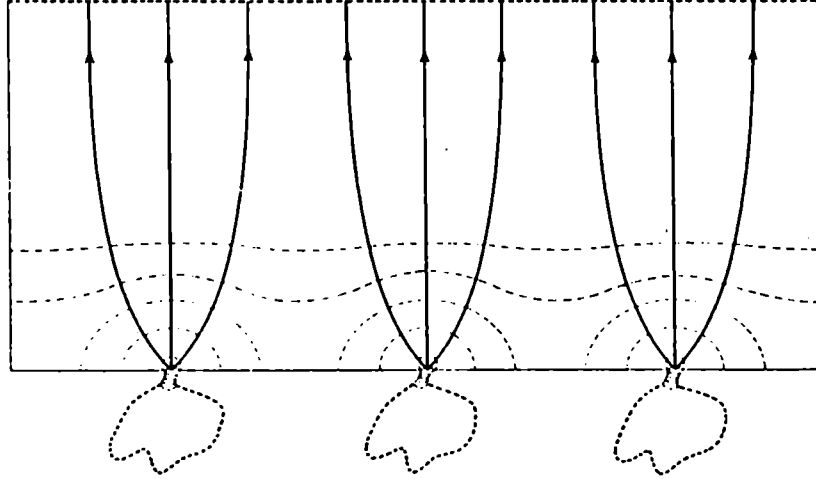


Fig. 1.4: Analogía eléctrica para la epidermis de una hoja con tres poros estomáticos.

A partir de la cual se obtiene la siguiente expresión para r_s :

$$r_s = 4(\ell + \pi d/8)/\pi n d^2 D \quad (1.2)$$

La Figura 1.4 puede ser usada para estimar el efecto de cierre del estoma sobre la resistencia total para la difusión del vapor de agua o dióxido de carbono desde una hoja, teniendo en cuenta la distribución de estomas sobre la superficie superior e inferior. Suponiendo que el trigo tiene hojas anfiestomáticas con la misma resistencia r_s sobre ambas epidermis, la resistencia total para ambas superficies es la suma de dos resistencias en series, por ejemplo $r_s + r_e$ y la resistencia total de la hoja es la suma de dos resistencias en paralelo, por ejemplo:

$$\left(\frac{1}{r_e + r_s} + \frac{1}{r_e + r_s} \right)^{-1} = (r_e + r_s)/2 \quad (1.3)$$

donde r_e es mucho menor que r_s , la resistencia de la hoja es aproximadamente $r_s/2$. Por otra parte, suponiendo que la hoja de la remolacha tiene hojas hipoestomáticas, las resistencias de dos superficies resultan $r_e + r_s$ (epidermis superior) y $r_e + \alpha$ (epidermis inferior), donde α es una resistencia mucho mayor que r_s y representa la resistencia de la cutícula. Combinando estas resistencias en paralelo se obtiene la resistencia total de la hoja, que resulta:

$$\left(\frac{1}{r_e + r_s} + \frac{1}{r_e + \alpha} \right)^{-1} \approx r_e + r_s \quad (1.4)$$

De mediciones realizadas con modelos de hojas de trigo (Thom, 1968) muestran que los valores de r para una hoja hipoestomática resultan un 30% menor que los obtenidos con una lámina plana de la misma dimensión. Esta diferencia se debe al incremento del intercambio que se produce alrededor de los bordes de la lámina.

ANEXO II

VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, DE LA TEMPERATURA Y DE LA HUMEDAD EN LA CAPA LIMITE DE SUPERFICIE

La capa límite de superficie o de flujos constantes es aquella parte de la atmósfera adyacente a la superficie terrestre en la que se observan pequeñas variaciones con la altura de las componentes verticales de los flujos turbulentos de calor, humedad y de cantidad de movimiento. En esta capa, la acción de la fuerza de Coriolis puede ser despreciada.

La estructura de la capa de superficie es compleja y la principal dificultad para una comprensión completa de su comportamiento es la turbulencia del aire. Su naturaleza no permite una solución integral de las ecuaciones que gobiernan los procesos que en ella se desarrollan.

Una forma de encarar el estudio de los procesos que se desarrollan en la capa límite de superficie de la atmósfera es mediante la hipótesis de la semejanza euleriana de Monin-Obukhov.

Esta hipótesis (ver por ejemplo Monin-Obukhov, 1954; Calder, 1966; Businger y otros, 1971; Mazzeo, 1982) se puede aplicar para parametrizar el aire que se desplaza sobre una superficie homogénea y aerodinámicamente lisa en condiciones estacionarias. Esta hipótesis propone que la cortante vertical de la velocidad media del viento (u) en la capa límite de superficie de la atmósfera depende de la altura (z), de la velocidad característica o velocidad de fricción (u_{*0}) y de la longitud de Monin-Obukhov (L_b) que posibilita la determinación del grado de estabilidad de la atmósfera. De esta forma, la cortante de la velocidad media del viento puede expresarse de la siguiente manera:

$$\partial u / \partial z = F(z, u_{*0}, L_0) \quad (2.1)$$

donde F es una función de tipo universal.

Mediante la aplicación del análisis dimensional ordinario (ver Zierep, 1971) resulta:

$$\partial u / \partial z = \frac{u_{*0}}{kz} \phi_M(z/L_0) \quad (2.2)$$

donde $\phi_M(z/L)$ es el perfil adimensional de la velocidad media del viento cuya forma funcional debe determinarse empíricamente y k es la constante de von Kármán.

Por otra parte, la longitud de Monin-Obukhov se define de la siguiente manera:

$$L_0 = \beta_0 / z_0 S_0 \quad (2.3)$$

donde $B_0 = gH_0/\rho c_p T$ es la producción o destrucción de la energía turbulenta por el empuje térmico, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire a presión constante, T la temperatura absoluta del aire, H_0 es el flujo de calor en superficie, $S_0 = u_{*0}^3/kz_0$ es la producción mecánica de energía cinética turbulenta y z_0 es la longitud de rugosidad de la superficie.

Businger y otros (1971), a partir de datos experimentales, encontraron las siguientes formas funcionales de $\phi_M(z/L_0)$ en función de la estabilidad atmosférica:

$$\begin{aligned} \phi_M(z/L_0) &= (1 - 15z/L_0)^{-1/4} & \text{si } z/L_0 < 0 \\ \phi_M(z/L_0) &= 1 - 4.7z/L_0 & \text{si } z/L_0 > 0 \\ \phi_M(z/L_0) &= 1 & \text{si } z/L_0 = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Reemplazando (2.4) en (2.2) e integrando, se obtiene la siguiente expresión del perfil vertical de la velocidad media del viento:

$$u/u_{*0} = (\ln(z/z_0) - \psi(z/L_0))/K \quad (2.5)$$

donde:

$$\begin{aligned} \psi(z/L_0) &= \ln[(1+\chi^2)/2] + \ln[(1+\chi)^2/2] - 2 \arctg \chi + \\ &\quad + \pi/2 \quad \text{si } z/L_0 < 0 \\ \psi'(z/L_0) &= -4.7 z/L_0 \quad \text{si } z/L > 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\psi(z/L_0) = 0 \quad \text{si } z/L = 0$$

$$\text{y } \chi = (1 - 15 z/L_0)^{1/4} = \phi_m(z/L_0)^{-1} \quad (2.7)$$

El gradiente vertical de la temperatura del aire en la capa límite de superficie, también, puede ser estudiado mediante la hipótesis de la semejanza euleriana de Monin-Obukhov.

Esta hipótesis postula que el gradiente de temperatura potencial (Θ) en la capa límite de superficie depende de la altura (z) de la temperatura característica (T_{*0}) y de la longitud de Monin-Obukhov (L_0), de esta forma resulta:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = F'(z, T_{*0}, L_0) \quad (2.8)$$

donde F' es una función universal.

Nuevamente aplicando el análisis dimensional ordinario (Zicrep, 1971) resulta:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{T_{*0}}{k z} \phi_H(z/L_0) \quad (2.9)$$

Siendo $\phi_H(z/H)$ el gradiente adimensional de la temperatura y k la constante de von Kármán que se incluye por conveniencia.

Businger y otros (1971) encontraron, a partir de datos experimentales, las siguientes formas funcionales de $\phi_H(z/L)$:

$$\phi_H(z/L_0) = 0.74 (1 - 9z/L_0)^{-1/2} \quad \text{si } z/L_0 < 0$$

$$\phi_H(z/L_0) = 0.74 + 4.7 z/L_0 \quad \text{si } z/L_0 > 0 \quad (2.10)$$

$$\phi_H(z/L_0) = 0.74 \quad \text{si } z/L_0 = 0$$

Reemplazando (2.10) en (2.9) e integrando, se obtiene la expresión del perfil vertical de temperatura desde superficie hasta un nivel arbitrario:

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_{*0}} = 0.74 \left(\ln \frac{z}{z_T} - \Psi_H(z/L_0) \right) \quad \text{si } z/L_0 < 0 \quad (2.11)$$

$$\text{con } \Psi_H(z/L_0) = \ln(1 + \gamma/z), \quad \gamma = 0.74 \phi_H(z/L_0)^{-1} \quad (2.12)$$

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_{*0}} = 0.74 \ln z/z_T + 4.7 z/L_0 \quad \text{si } z/L_0 > 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_{*0}} = 0.74 \ln z/z_T \quad \text{si } z/L_0 = 0 \quad (2.14)$$

donde θ_0 se define como la temperatura potencial en el nivel $z = z_\tau$, con z_τ la longitud de rugosidad para el calor.

El perfil vertical de humedad específica puede obtenerse en forma análoga al de temperatura. De esta forma se obtiene:

$$\frac{q - q_0}{q_h} = \frac{1}{k} \left(\ln \frac{z}{z_h} - \Psi_q(z/L_0) \right) \quad (2.15)$$

donde $\Psi_q \approx \Psi_\theta$ y z_h es la longitud de rugosidad para el vapor de agua.

ANEXO III

SINTESIS SOBRE EL ANALISIS DIMENSIONAL (TEOREMA π DE BUCKINGHAM)

La aplicación del análisis dimensional a problemas prácticos se basa en la hipótesis de que su solución se expresa mediante una ecuación dimensionalmente homogénea en términos de los argumentos que se consideran en el problema.

Una de las bases fundamentales del análisis dimensional es el Teorema π de Buckingham (ver Zierep, 1971).

En él se postula que una ecuación dimensionalmente homogénea puede reducirse a una relación entre un sistema de productos adimensionales, con la única restricción de que las variables a considerar deben ser positivas.

Sean Q_1, Q_2, \dots, Q_n cantidades físicas dimensionales cuya relación resulta:

$$C \quad F(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = 0 \quad (3.1)$$

Considerando una base de $m = n$ cantidades dimensionales, $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_m$, $[Q_k]$ puede ser expresada como productos de potencias de los Λ_k , resultando:

$$\begin{aligned} [Q_1] &= \Lambda_1^{a_{11}} \Lambda_2^{a_{21}} \dots \Lambda_m^{a_{m1}} \\ [Q_2] &= \Lambda_1^{a_{12}} \Lambda_2^{a_{22}} \dots \Lambda_m^{a_{m2}} \\ &\vdots \\ [Q_n] &= \Lambda_1^{a_{1n}} \Lambda_2^{a_{2n}} \dots \Lambda_m^{a_{mn}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

El problema que se presenta es conocer si existen números

adimensionales de la forma:

$$\pi = Q^{k_1} Q^{k_2} \dots Q^{k_n} \quad (3.3)$$

y si ellos existen, cuál es su cantidad.

Si se reemplazan los valores de Q expresados por (3.2) en (3.3) se obtiene:

$$[\pi] = \Lambda_1^0 \dots \Lambda_m^0 = \left\{ \Lambda_1^{a_{11}} \dots \Lambda_m^{a_{m1}} \right\}^{k_1} \dots \left\{ \Lambda_1^{a_{1n}} \dots \Lambda_m^{a_{mn}} \right\}^{k_n} \quad (3.4)$$

de lo que resulta:

$$\begin{aligned} a_{11} k_1 + a_{12} k_2 + \dots + a_{1n} k_n &= 0 \\ a_{21} k_1 + a_{22} k_2 + \dots + a_{2n} k_n &= 0 \\ \cdot &\quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot &\quad \cdot \quad \cdot \\ a_{m1} k_1 + a_{m2} k_2 + \dots + a_{mn} k_n &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

El sistema (3.5) de m ecuaciones y n incógnitas k_1, k_2, \dots, k_n es lineal y homogéneo y puede ser resuelto a partir de la siguiente matriz dimensional:

	Q_1	Q_2	\cdot	\cdot	\cdot	Q_n
Λ_1	a_{11}	a_{12}	\cdot	\cdot	\cdot	a_{1n}
Λ_2	a_{21}	a_{22}	\cdot	\cdot	\cdot	a_{2n}
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot
Λ_m	a_{m1}	a_{m2}	\cdot	\cdot	\cdot	a_{mn}

(3.6)

La matriz dimensional será de rango r si tiene por lo menos un determinante de orden r distinto de cero. De esta forma, para un sistema de ecuaciones lineales homogéneas de n incógnitas cuya matriz tiene rango r habrá $n-r$ soluciones linealmente independientes.

La función $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) = 0$ resuelve el problema propuesto o lo que es lo mismo $\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-r})$.

La aplicación del Teorema π de Buckingham debe realizarse en una determinada secuencia:

- a. Determinación de las variables físicas dimensionales más significativas del problema a resolver (es decir los argumentos).
- b. Elección de las correspondientes dimensiones.
- c. Construcción de la matriz dimensional y evaluación de su grado.
- d. Determinación de los $n-r$ números adimensionales.
- e. Derivación de la función $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) = 0$ como solución del problema.

Tabla I

Valores de velocidad relativa u' (%) a sotavento de una cortina rompevientos para diferentes porosidades, alturas z' y distancias x' a la cortina obtenidos por Raine (1974) (ver Hagen y Skidmore, 1971).

$P = 20\%$

$z_0/H = 3.3 \times 10^{-3}$

$z' \setminus x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1	36	48	54	58	63	66	73	78
0.5	17	27	38	43	48	58	66	78

$P = 34\%$

$z_0/H = 3.3 \times 10^{-3}$

$z' \setminus x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1	55	64	68	72	--	76	78	84
0.5	35	41	49	55	59	67	75	85

$P = 50\%$

$z_0/H = 3.3 \times 10^{-3}$

$z' \setminus x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1	72	74	76	78	81	83	84	85
0.5	48	52	57	63	67	73	77	88

Tabla II

Valores de velocidad relativa $u(\%)$ a sotavento de una cortina rompevientos para el nivel $z' = 0.25$ para diferentes distancias (x') y porosidades (P) (Ilagen y otros, 1981)

$H = 122 \text{ cm}$

$z_0 = 1.63 \text{ cm}$

$P \backslash x'$	2	4	6	9	12
20%	22	20	34	48	57
40%	25	25	43	59	65
60%	60	43	47	65	73

Tabla III

Valores de u' en función de la distancia (x') para diferentes porosidades y alturas (z'):

Si $z' = 1.0$

$P \backslash x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
20%	0.13	0.23	0.29	0.34	0.40	0.45	0.53	0.61
34%	0.30	0.41	0.46	0.52	--	0.56	0.61	0.70
50%	0.52	0.55	0.58	0.61	0.66	0.69	0.71	0.72

Si $z' = 0.5$

$P \backslash x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
20%	0.03	0.07	0.14	0.17	0.23	0.3	0.44	0.59
34%	0.12	0.17	0.24	0.33	0.35	0.45	0.59	0.72
50%	0.23	0.27	0.32	0.4	0.45	0.50	0.60	0.7

Continuación TABLA III

Si $z' = 0.25$

$P \backslash x'$	2	4	6	9	12
20%	0.05	0.04	0.14	0.25	0.32
40%	0.05	0.06	0.18	0.35	0.42
60%	0.36	0.18	0.22	0.42	0.53

Tabla IV

Valores de la pendiente (m) y la ordenada (o) para diferentes z' , correspondientes a la ecuación (58) y (59).

Pendiente (m)

$z' \backslash x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1	0.013	0.011	9.18×10^{-3}	8.93×10^{-3}	8.7×10^{-3}	8.4×10^{-3}	6.2×10^{-3}	3.96×10^{-3}

$z' = 0.25$

	2	4	6	9	12
20% = P = 40%	0	0.84×10^{-3}	1.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}	5.1×10^{-3}
40% = P = 50%	1.5×10^{-3}	11.3×10^{-3}	1.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}	5.1×10^{-3}

Ordenada (o)

$z' \backslash x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1.0	1.3	1.00	0.89	0.83	0.78	0.73	0.59	0.46

$z' = 0.25$

	2	4	6	9	12
20% = P = 40%	0.94	0.98	0.873	0.832	0.793
40% = P = 50%	1.53	1.54	0.873	0.832	0.793

Tabla V

Experiencias de campo realizadas por diferentes autores y utilizadas para la obtención de $R_2(x', z', P)$ y $R_3(x', z')$ y la verificación del modelo propuesto.

Experiencia	Obtención R_2 incluida en ec.(68)	Obtención R_3 incluida en ec.(63)	Verificación ec. (67)	Verificación ecs.(81)-(84)
Raine(1974)	X		X	
Hagen y otros(1981)	X			
Maki(1982)		X		X
Maki y Kawashima(1985)			X	
Wilson(1987)			X	X
Maki(1985)				X
Hagen y Skidmore(1971)				X

Tabla VI

Valores de la velocidad media del viento (m/s) para diferentes alturas z' y distancias x' a la cortina rompevientos obtenidos por Maki (1982).

$P = 50\%$

$H = 200 \text{ cm}$

$z_o = 2 \text{ cm}$

$z' \backslash x'$	-20	2	3.75	5	7.5	10	15	20
1	5.67	2.52	2.96	3.4	3.91	4.35	4.72	5.04
0.75	5.23	2.39	2.46	2.77	2.28	3.84	4.28	4.6
0.5	4.6	2.07	1.79	2.08	2.65	3.21	3.72	4.02
0.25	3.72	1.95	1.92	1.76	2.2	2.46	2.96	3.4

TABLA VII

Valores calculados de la función R_z (z/H , x/H) para diferentes alturas z' y distancias x' relativas

$z' \backslash x'$	2	3.75	5	7.5	10	15	20
1	2.56	2.2	1.84	1.43	1.07	0.77	0.51
.75	2.34	2.29	2.03	1.61	1.15	0.78	0.52
0.5	2.16	2.39	2.14	1.66	1.18	0.75	0.48
0.25	1.53	1.56	1.7	1.32	1.09	0.66	0.28

Tabla VIII

Valores de a_3 , b_3 y c_3 correspondientes a la expresión (6)

z'	a_3	b_3	c_3
1.0	3.020	0.259	6.8×10^{-3}
0.75	2.861	0.202	4.2×10^{-3}
0.5	2.754	0.169	2.6×10^{-3}
0.25	1.872	0.078	0.0

TABLA IX

Valores de d_3 , e_3 , f_3 , g_3 , h_3 e i_3 correspondientes a las expresiones (64) a (66):

d_3	e_3	f_3	g_3	h_3	i_3
3.049	0.0737	0.033	0.231	2.1×10^{-3}	8.8×10^{-3}

Tabla X

Valores calculados de la función $R_2(z/h, x/l, P)$ para diferentes porosidades de rompevientos, alturas $z' = 1$ y 0.5 y distancias relativas x' .

$P = 20\%$

$z' \backslash x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1	3.65	2.97	2.62	2.4	2.11	2.0	1.54	1.25
0.5	4.16	3.66	3.1	2.86	2.6	2.1	1.7	1.1

$P = 34\%$

$z' \backslash x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1	2.45	2.05	1.83	1.59	--	1.37	1.25	0.91
0.5	3.24	2.94	2.5	2.25	2.07	1.65	1.25	0.75

$P = 50\%$

$z' \backslash x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1	1.6	1.48	1.37	1.25	1.08	0.97	0.91	0.85
0.5	2.6	2.4	2.15	1.87	1.69	1.35	1.15	0.6

Tabla XI

Valores calculados de la función $R_2(z/H, x/H, P)$ para diferentes porosidades de de cortina rompevientos, nivel $z' = 0.25$ y diferentes distancias x' .

$P \setminus x'$	2	4	6	9	12
20	2.28	2.34	1.93	1.52	1.26
40	2.2	2.2	1.67	1.2	1.02
60	1.17	1.67	1.55	1.02	0.79

Tabla XII

Valores de la ordenada (O_2) y la pendiente (M_2) en función de la distancia (x') para $z' = 1.0$ y 0.5 , correspondientes a las ecuaciones (69) y (70).

Valores de O_2

$z' \setminus x'$	2	4	6	8	10	12	16	20
1.0	2.23	1.63	1.37	1.28	1.13	1.13	0.68	0.45
0.5	5.12	4.45	3.71	3.4	3.16	2.56	1.99	1.37

Valores de M_2

1.0	10.33	7.83	6.72	6.2	5.50	5.40	3.58	2.58
0.5	0.051	0.041	0.032	0.033	0.03	0.025	0.018	0.016

Tabla XIII

Valores de la ordenada (O_2) y la pendiente (M_2) en función de la distancia para $z'=0.25$ y diferentes rangos de porosidades, correspondientes a las ecuaciones (71) y (72).

Valores de O_2

	2	4	6	9	12
20% $\leq P \leq 40\%$	2.36	2.48	2.08	1.74	1.57
40% $\leq P \leq 60\%$	4.24	3.48	2.08	1.74	1.57

Valores de M_2

	4×10^{-3}	7×10^{-3}	9.25×10^{-3}	0.012	0.013
20% $\leq P \leq 40\%$	4×10^{-3}	7×10^{-3}	9.25×10^{-3}	0.012	0.013
40% $\leq P \leq 60\%$	0.051	0.032	9.25×10^{-3}	0.012	0.013

Tabla XIV

Valores de a_2 , b_2 , a'_2 , b'_2 correspondientes a las ecuaciones (73) y (74) ($z'=1$) y c_2 , d_2 , e_2 , c'_2 , d'_2 y e'_2 correspondientes a las ecuaciones (75) y (76) ($z'=0.5$).

z'	a'_2	b'_2	a_2	b_2			
1.0	10.21	0.42	2.01	0.081			
	c'_2	d'_2	e'_2	c_2	d_2	e_2	
0.5	5.63	0.314	5.1×10^{-3}	0.055	3.6×10^{-3}	8.2×10^{-5}	

TABLA XV

Valores de f_2 , g_2 , f_2' y g_2' correspondientes a las ecuaciones (77) y (76) para $z' = 0.25$ ($20\% \leq P \leq 40\%$) y h_2 , i_2 , j_2 , h_2' , i_2' y j_2' ($40\% \leq P \leq 50\%$).

	f_2'	g_2'	f_2	g_2		
20%≤P≤40%	2.66	0.93	2.2×10^{-3}	4.6×10^{-3}		
	h_2'	i_2'	j_2'	h_2	i_2	j_2
40%≤P≤50%	5.76	0.786	0.036	0.119	0.049	4.5×10^{-4}

TABLA XVI

Coefficiente $K_{x'}$
3 20

N

$z' = 1.0$

$$P \left[\frac{a-bx'}{\ln(z'/z'_0)} \right] / \left[1 - [a' - b'x' - (a-bx') \ln P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta P}{P} \right]$$

0.66 0.09

$$z'_0 \left[\frac{-a' + b'x' + (a-bx') \ln P}{\ln(z'/z'_0)^2} \right] / \left[1 - [a' - b'x' - (a-bx') \ln P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta z'_0}{z'_0} \right]$$

0.10 0.01

$$H \left[\frac{-b'x' + bx \ln P}{\ln(z'/z'_0)H} \right] / \left[1 - [a' - b'x' - (a-bx') \ln P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{H}{H} \right]$$

0.19 0.11

$z' = 0.5$

$$P \left[\frac{P [c-dx' + ex'^2]}{\ln(z'/z'_0)} \right] / \left[1 - [c' - d'x' + e'x'^2 - (c-dx' + ex'^2) P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta P}{P} \right]$$

1.46 0.24

$$z'_0 \left[\frac{-c' + d'x' - e'x'^2 - \frac{c-dx' + ex'^2}{\ln(z'/z'_0)^2} P}{\ln(z'/z'_0)^2} \right] / \left[1 - [c' - d'x' + e'x'^2 - (c-dx' + ex') P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta z'_0}{z'_0} \right]$$

0.20 0.02

$$H \left[\frac{\left(\frac{-d'x' + e'x'^2}{H} + \frac{dx}{H} - \frac{ex^2}{H} \right) P}{\ln(z'/z'_0)} \right] / \left[1 - [c' - d'x' + e'x'^2 - (c-dx' + ex') P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta H}{H} \right]$$

0.18 0.33

$z' = 0.25$ y $20\% \leq P \leq 40\%$

$$P \left[\frac{P [-f+gx'^{1/2}]}{\ln(z'/z'_0)} \right] / \left[1 - [f' - g'x' - (-f+gx'^{1/2}) P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta P}{P} \right]$$

0.81 0.28

$$z'_0 \left[\frac{-f' + gx' + (-f+gx'^{1/2}) P}{\ln(z'/z'_0)^2} \right] / \left[1 - [f' + g'x' - (-f+gx'^{1/2}) P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta z'_0}{z'_0} \right]$$

0.75 0.15

$$H \left[\frac{-2g'x + gx \ln P}{H \ln(z'/z'_0)} \right] / \left[1 - [f' - g'x' - (-f+gx'^{1/2}) P] / \ln(z'/z'_0) \right] \left[\frac{\Delta H}{H} \right]$$

0.51 0.32

Tabla XVI (continuación)

$z' = 0.25$ y $40\% \leq P \leq 50\%$

P	$\left[\frac{\left[\frac{P(h-ix')^{1/2} + ix'^2}{\ln(z'/z'_0)} \right] / \left[1 - (h' - i'x' + j'x'^2 - (h-ix')^{1/2} + jx'^2)P \right] / \ln(z'/z'_0)} \right] \cdot \frac{\Delta P}{P}$	1.78	1.23
z'_0	$\left[\frac{-h' + i'x' - i'x'^2}{\ln(z'/z'_0)^2} - \frac{(h-ix')^{1/2} + ix'^2}{\ln(z'/z'_0)^2} P \right] / \left[1 - (h'x' + j'x'^2 - (h-ix')^{1/2} + jx'^2)P \right] \ln(z'/z'_0) \left] \frac{\Delta z'_0}{z'_0} \right]$	0.51	0.31
H	$\left[\frac{\left[\frac{-i'x' + 2j'x'^2}{H^2} + \frac{(ix')^{1/2} - 2ix'^2}{2H} \right] / \ln(z'/z'_0)} \right] / \left[1 - \frac{h' - i'x' - j'x'^2 - (h-ix')^{1/2} + jx'^2}{H^2} P \right] \ln(z'/z'_0) \left] \frac{\Delta H}{H} \right]$	0.51	0.32

Rango de las variables:

- P 20% a 50%
- z'_0 10^{-2} m a 10m
- H 1m a 3m

Tabla XVII

Velocidades relativas u' (%) calculadas a partir de la ecuación (67) y correspondientes a las condiciones de la experiencia de Maki (1982) (Tabla XVIII).

Experiencia N° 1

$z' \setminus x'$	5	10	15	20
1	55	74	86	94
0.6	43	60	73	81

Experiencia N° 2

$z' \setminus x'$	5	8	10	15	20
0.6	42	53	60	73	81

Experiencia N° 3

0.6	52	61	67	77	85
-----	----	----	----	----	----

Tabla XVIII

Valores de la velocidad del viento (m/s) para diferentes niveles z' y distancias x' a la cortina rompevientos para tres experimentos realizados por Maki y Kawashima (1983).

$P = 50\%$

$H = 50 \text{ cm}$

Experiencia N° 1

$z_0 = 0.8 \text{ cm}$

$z' \setminus x'$	-20	2	5	10	15	20
1	3.36	2.05	2.32	2.79	2.95	3.16
0.6	3.03	1.80	1.68	2.17	2.50	2.99

Experiencia N° 2

$z_0 = 0.7 \text{ cm}$

$z' \setminus x'$	-20	2	5	8	10	15	20
0.6	2.4	1.0	1.32	1.39	1.63	1.87	2.02

Experiencia N° 3

$z_0 = 0.4 \text{ cm}$

$z' \setminus x'$	-20	2	5	8	10	15	20
0.6	5.3	2.39	3.23	3.65	3.98	4.24	4.77

Tabla XIX

Velocidades relativas u' (%) obtenidas a partir de la ecuación (67), correspondientes a las condiciones de las experiencias de Raine (1971) (Tabla I)

$z' \setminus x'$	4	6	8	10	12	16	20
1	63	70	76	80	84	89	91
0.5	60	64	69	74	78	87	94

Tabla XX

Velocidades relativas u' (%) obtenidas a partir de la ecuación (67), correspondientes a las condiciones de las experiencias de Wilson (1987) (Tabla XXI).

$z' \setminus x'$	2.6	4.1	5.5	8.2	13.6
1.0	46	53	59	70	84
0.5	34	40	45	53	68
$z' \setminus x'$	2.6	4.1	5.5	8.2	10.6
0.25	44	49	51	61	69

Tabla XXI

Velocidades relativas u' (%) observadas a sotavento de una cortina rompevientos para diferentes niveles z' y distancias x' (Wilson, 1987).

$P = 50\%$

$H = 112 \text{ cm}$

$z_o = 1.5 \text{ cm}$

$z' \backslash x'$	2.6	4.1	5.5	8.2	13.6
1	54	55	68	74	90
0.5	41	43	46	63	83
$z' \backslash x'$	2.6	4.1	5.5	8.2	13.6
0.25	33	40	42	54	70

Tabla XXII

Valores de diferentes medidas estadísticas de los modelos de
porosidad constante y variable

	POROSIDAD	
	Constante	Variable
N	47	51
\bar{O}	0.69	0.65
\bar{E}	0.65	0.67
S_o	0.016	0.04
S_E	0.017	0.04
\hat{a}	0.04	0.06
\hat{b}	0.89	0.94
FAM	0.06	0.05
RECM	0.08	0.06
RECM _s	0.02	0.003
RECM _v	0.06	0.05
d	0.98	0.92
r ²	0.83	0.92

TABLA XXIII

Velocidades relativas obtenidas a partir de las ecuaciones (81) a (84) correspondientes a las condiciones de las experiencias de Maki (1982), para $P= 50\%$.

$z' \setminus x'$	3.75	5	7.5	10	15	20
1	57	60	66	71	82	84
0.5	39	43	50	58	72	85
0.25	44	47	57	68	83	86

TABLA XXIV

Velocidades relativas obtenidas a partir de las ecuaciones (81) a (84) correspondientes a las condiciones de las experiencias de Wilson (1987) (Tabla XXI), para $P= 50\%$

$z' \setminus x'$	2.65	4.1	5.5	8.2	13.6
1	52	55	59	65	70
0.5	30	35	40	49	60
$z' \setminus x'$	2.65	4.1	5.5	8.2	10.6
0.25	38	40	44	56	67

TABLA XXV

Velocidades obtenidas a partir de las ecuaciones (81) a (84), correspondientes a las condiciones de las experiencias de Maki (1985) (TABLA XXVI), para $P= 30\%$

$z' \setminus x'$	3	5	10	20
1	75	77	84	96
0.5	71	74	82	92
0.25	79	81	87	98

TABLA XXVI

Velocidades relativa (%) a sotavento de una cortina rompevientos obtenidas por Maki (1985).

$P= 30\%$

$z_0 = 1.6 \times 10^{-3}$

$H= 200 \text{ cm.}$

$z' \setminus x'$	3	5	10	20
1	81	85	90	95
0.5	73	76	84	96
0.25	74	75	80	92

TABLA XXVII

Velocidades relativas (%) obtenidas a partir de las ecuaciones (81) a (84), aplicadas a las condiciones de la experiencia de Hagen y Skidmore (1971) (TABLA XXVIII), para $P= 20\%$

$z' \setminus x'$	6	12	20
1	45	63	88
0.5	40	61	79

TABLA XXVIII

Velocidades relativas (%) a sotavento de una cortina rompevientos obtenidas por Hagen y Skidmore (1971).

$P= 20\%$

$z_0 / H = 3.3 \times 10^{-3}$

$z' \setminus x'$	6	12	20
1	48	57	83
0.5	43	54	81